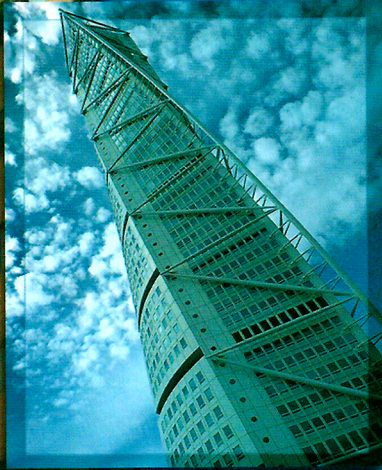


# أساسيات تكنولوجيا الخرسانة

الأستاذ الدكتور

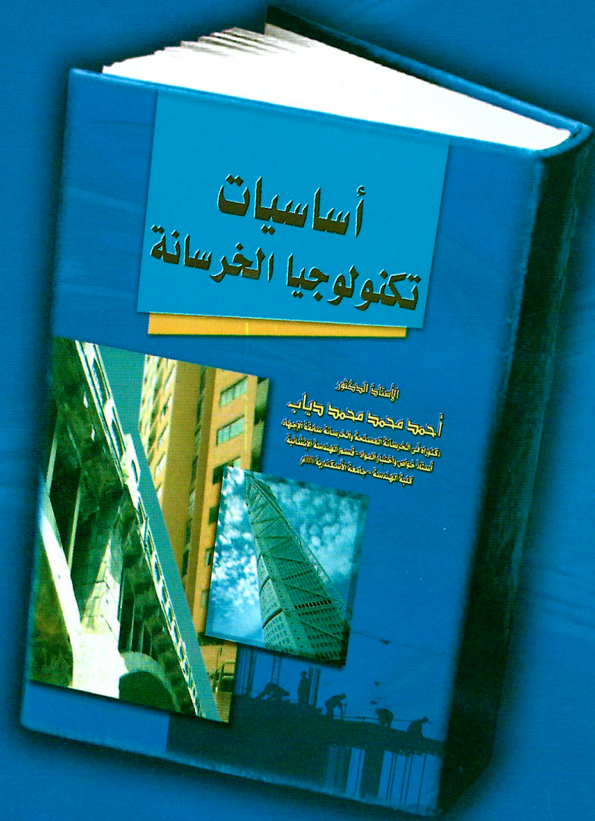
أحمد محمد دياب

دكتوراه في الخرسانة المسلحة والخرسانة سابقة الإجهاد  
أساتذة خواص واختبار المواد - قسم الهندسة الإنشائية  
كلية الهندسة - جامعة الإسكندرية



أساسيات تكنولوجيا الخرسانة

أ.د. أحمد محمد دياب



SCANED BY  
ENG.OSAMA TAREK



## الباب السادس تحميلية الخرسانة (Durability of Concrete)

1-6 عام:

إن الخرسانة بعد تمام شكمها وتصلبها تتعرض للأحمال والقوى الخارجية الناشئة عن وزن المنشأ والأحمال المتحركة والرياح والزلازل وغيرها. وهى يتم تناولها من جهة تحقيق المقاومة الممتدولة وباقى الخواص الميكانيكية، ثم توضع شروط التصميم النظرى لكل جزء من أجزاء المبنى. وعلى الجانب الآخر يتعرض المنشأ لعوامل المهاجمة المختلفة، والتي يمكن تلخيصها فى الآتى:

أ- المهاجمة الكيميائية، والتي تنقسم إلى:

1. المهاجمة بالكبريتات.
2. المهاجمة بماء البحر.
3. النض والتزهير والكربنة.
4. المهاجمة بالغازات.
5. الأحماض والقلويات.
6. صدأ صلب التسليح.
7. التفاعل القلوى للركام.

ب- المهاجمة الميكانيكية:

1. التثليج وذوبانه.
2. البلال والجفاف.
3. التغيرات الجوية.
4. التآكل بالبرى والنحر والاحتكاك.

ج- الحريق.

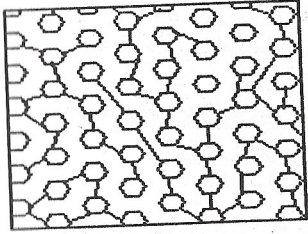
وهذه العوامل السابق ذكرها قد يكون لها الفعل الأكثر تأثيراً على المنشأ مقارنة بالأحمال الخارجية التى يسهل التعامل معها، لأن هذه العوامل المهاجمة قد يتولد عنها شروخ أو تفتت أو تشقق الغطاء الخرسانى لصلب التسليح، وبالتالي يتأثر قطاع المنشأ وتزيد الإجهادات الناتجة عن الأحمال الخارجية الواقعة عليه، مما قد يؤدي إلى حدوث شروخ أو انهيار أو فقد المنشأ لأداء وظائفه التى أنشأ من أجلها. وعلى هذا يمكن تعريف خاصية التحملية (أو التحمل) (Durability) للخرسانة بأنها الخاصية التى تعبر عن تحمل الخرسانة للظروف الخارجية أو الداخلية، الكيميائية أو الميكانيكية المحيطة بها أو الحريق، ومقدرتها على الاحتفاظ بشكلها الخارجى وتجانسها وعدم فقدانها لمقاومتها وعدم حدوث شروخ أو تفتت أو انهيار جزئى أو كلى لها.

فكأما احتفاظ المنشأ بشكله المعمارى وقام بأداء وظائفه وأهمها الوظائف الإنشائية، دون حدوث أضرار أو فقد لجزء من جساءة عضو من أعضائه أو فقد لمقاومته، قيل أن هذا المنشأ له تحملية جيدة. بينما إذا كانت الخرسانة عندها قابلية سريعة لظهور الشروخ وظهور التفتت وفقد المقاومة، قيل أن تحمليتها ضعيفة. وبذلك نجد أن التحملية خاصية نسبية فنقول تحملية جيدة أو ضعيفة مقبولة أو تحملية ضعيفة.

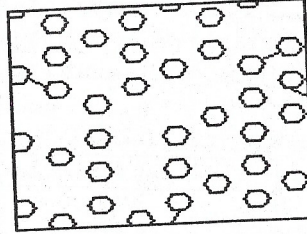
ويمكن الحكم على التحمل فى المعمل من خلال قياس الفقد فى الوزن أو الفقد فى المقاومة أو قياس التمدد فى عينات معملية، مع ملاحظة تدوين حدوث تآكل أو تقشير أو شروخ أو تفتت فى هذه العينات المختبرة.



## فراغات غير شعيرية فراغات شعيرية



خرسانة  
W/C=0.70  
C=400 Kg/m<sup>3</sup>



خرسانة  
W/C=0.40  
C=400 Kg/m<sup>3</sup>

W/C (water cement ratio)  
C (cement content)

شكل رقم (1-6) تأثير نسبة الماء إلى الأسمنت على الفراغات الشعيرية والغير شعيرية

تأثير المعالجة:

إن للمعالجة دور هام في تقليل نفاذية الخرسانة، حيث أن المعالجة تعمل على استمرارية تكون الجل. وبالتالي يقوم الجل بكسر استمرارية شبكة الفراغات الشعيرية الداخلية للخرسانة. يعمل على إقلال النفاذية. ويتضح ذلك من جدول (1-6)؛ والذي يوضح زمن المعالجة اللازم للوصول إلى خرسانة غير منفذة.

جدول رقم (1-6) الزمن اللازم للوصول إلى شبكة فراغات شعيرية غير متصلة.

نسبة W/C	زمن المعالجة المستمر اللازم (يوم)
0.40	3
0.45	7
0.50	28
0.60	180
0.70	365
أكثر من 0.70	لا يمكن تحقيقه

والجدول السابق يوضح أنه إذا زادت نسبة W/C عن 0.70، فإنه من الصعب الوصول لخرسانة غير منفذة مهما تم الاهتمام بالمعالجة. وعلى المهندس ألا ينسى أن هذا الأمر تم إرضائه في المعمل. ففي الحقل تنخفض هذه النسبة، وربما تصل إلى 0.55. وهذا يوضح لنا كيف أن أغلب المنشآت السكنية تكون بلاطات الأسقف النهائية لها منفذة للماء بطريقة واضحة.

وهذا الجدول يوضح أيضاً أنه في حالة تعرض الخرسانة لظروف خارجية مثل مهاجمة الأملاح، فإنه من المفضل ألا تزيد نسبة الماء للأسمنت عن 0.45، حيث أن المعالجة في الموقع تكون في حدود 7 أيام.

عمر الخرسانة:

أما بالنسبة للمنشآت في الموقع فيتم عمل تفتيش دوري عليها. ويتم الاستعانة بفحص بصري من خبير يدون خلال هذا الفحص شكل وطبيعة الشروخ التي تظهر بالخرسانة وتصويرها. ويمكن أخذ عينات من المبنى وعمل اختبار الضغط والتحليل الكيميائي عليها والتصوير الميكروسكوبي والفحص بالأشعة السينية، لتحديد مقاومة الضغط وشكل التكوين الداخلي والمركبات الكيميائية للخرسانة على الترتيب، ومقارنتها بوضع وخواص المنشأ عند تنفيذه. كما يمكن الاستعانة بالاختبارات الغير متلفة لتحديد إمكانية وجود صدأ صلب التسليح أو تحديد مقاومة الخرسانة..... الخ.

والآن سنتناول المهاجمة الكيميائية، والتي ترتبط ارتباطاً وثيقاً بنفاذية الخرسانة.

## 2-6 نفاذية الخرسانة (Permeability of Concrete):

هي الخاصية التي تعبر عن حركة السوائل أو الغازات داخل الخرسانة. حيث أن الخرسانة يتطلب فيها أحياناً أن تكون غير منفذة مثل الخرسانة المستخدمة في خزانات الماء والسوائل. وكلما كانت الخرسانة ذات نفاذية عالية، كانت حركة السوائل والأبخرة سهلة مما يعرضها للمهاجمات الكيميائية والميكانيكية، نتيجة نفاذ الماء حاملاً معه الأملاح الضارة، أو دخول الأكسجين وثاني أكسيد الكربون إلى داخل الخرسانة، مما يُعجل ظهور صدأ صلب التسليح.

إن حركة الماء داخل الخرسانة ليس شرط أن تحدث نتيجة فرق في ضغط الماء، ولكن يمكن حدوثها نتيجة وجود اختلاف في نسبة الرطوبة بين الأماكن المختلفة في الخرسانة. ويمكن الحكم عليها بنظرية الانتشار (Diffusion Theory).

إن المونة الأسمنتية والركام كلاهما يحتوي على نسبة من الفراغات، هذا بالإضافة للفراغات التي تحدث بينهما. ومنظومة الفراغات مجتمعة تؤدي إلى زيادة نفاذية الخرسانة أو نقصها. وهذا يتوقف أساساً على مدى اتصال نظام الفراغات الداخلية من عدمه.

فعامة كلما زادت النسبة المئوية للفراغات تزيد النفاذية. ولكن أهم من ذلك طبيعة الفراغات، هل الفراغات غير شعيرية (أي غير متصلة) أم فراغات شعيرية (أي متصلة). فوجود نسبة من الفراغات الشعيرية يؤدي إلى وجود شبكة داخلية من الفراغات تزيد من نفاذية الخرسانة. والعكس صحيح؛ لو قلت أو تلاشت الفراغات الشعيرية تقل النفاذية، انظر شكل (1-6).

## 1-2-6 العوامل المؤثرة على النفاذية:

1- نسبة الماء إلى الأسمنت:

يعتبر هذا العامل من أهم العوامل. ويتضح ذلك من شكل رقم (1-6)، حيث أنه كلما زادت نسبة الماء إلى الأسمنت (W/C)، يقل تركيز الجل في الخرسانة وتزيد الفراغات الشعيرية المتصلة، وبالتالي يزداد معامل النفاذية. والعكس صحيح؛ فكلما قلت نسبة W/C، يزداد تركيز الجل في الخرسانة وتقل نسبة الفراغات الشعيرية، فتقل نفاذية الخرسانة. ومما هو جدير بالذكر أن الخرسانة الكثيفة الغنية تحقق معامل نفاذية صغير جداً، مقارنة بصخور مثل الرخام والجرانيت. ولذلك فإن الاهتمام بصناعة الخرسانة من الممكن أن يحقق خرسانة غير منفذة للماء.



### 3-2-6 اختبار الامتصاص والوزن النوعي للخرسانة :

توضع عينات جافة في الماء لمدة 48 ساعة، ثم تعرض لماء مغلي لفترة قياسية. ومنها نحدد النسبة المئوية للامتصاص الطبيعي والامتصاص الكامل ونسبة الفراغات، بالإضافة إلى الوزن النوعي والحجمي طبقاً لمواصفات (ASTM C 642) والتي ستذكر فكرتها فيما يلي:

1. تجفف العينة في فرن التجفيف حتى يثبت وزنها، ثم توزن جافة وليكن وزنها (A).
2. تغمر عينة الخرسانة في الماء لمدة 48 ساعة، ثم يجفف سطحها وتوزن (B).
3. تغمر الخرسانة في الماء ويرفع درجة حرارته بطريقة قياسية ويترك في الماء المغلي لمدة 5 ساعات، ثم يبرد بطريقة قياسية، ثم يجفف سطحها وتوزن بعد تجفيف سطحها (C).
4. توزن العينة في ماء في درجة الحرارة العادية معلقة وليكن الوزن (D).

الامتصاص الطبيعي:

$$\text{Absorption after immersion}\% = ((B - A) / A) \times 100 \quad (1-6)$$

الامتصاص الكامل:

$$\text{Absorption after immersion and boiling}\% = ((C - A) / A) \times 100 \quad (2-6)$$

الوزن النوعي الشامل:

$$\text{Bulk sp. gr. dry} = A / (C - D) = g_1 \quad (3-6)$$

الوزن النوعي الظاهري:

$$\text{Apparent sp. gr. dry} = A / (A - D) = g_2 \quad (4-6)$$

النسبة المئوية للفراغات الشعرية:

$$(C - A) / (C - D) \times 100 \quad (5-6)$$

$$\text{معامل التشيع} = \frac{\% \text{ لامتصاص الطبيعي}}{\% \text{ لامتصاص الكامل (موجودة في المواصفات المصرية فقط)}} \quad (6-6)$$

وكما كان الامتصاص الطبيعي متقارب مع الامتصاص الكامل، دل ذلك على زيادة نفاذية الخرسانة، والعكس صحيح.

### 3-6 مهاجمة الخرسانة بالكيماويات:

#### 3-6-1 إماهة الأسمنت:

تتعرض الخرسانة في الطبيعة في بعض الأعمال الإنشائية إلى مجموعة مختلفة من الكيماويات. وتقاوم الخرسانة تلك الكيماويات حسب طبيعة المادة المهاجمة وتركيزها والاحتكاكات التي يقوم بها المهندس. وحتى يمكن للمهندس تتبع سلوك الخرسانة عند مهاجمتها بالكيماويات، سنستعرض فيما يلي كلاً من تركيب الأسمنت وإماهة الأسمنت مختصراً. ويمكن الرجوع لباب الأسمنت للاطلاع على المعادلات الكيميائية الموزونة.

تركيب الأسمنت:

يحتوي الأسمنت المعبأ أو السائب على المركبات الكيميائية التالية:

- سيليكات ثلاثي الكالسيوم  $C_3S$ .
- سيليكات ثنائي الكالسيوم  $C_2S$ .
- ألومينات حديدي رباعي الكالسيوم  $C_4AF$ .
- ألومينات ثلاثي الكالسيوم  $C_3A$ .

بالطبع فإن عمر الخرسانة له دور كبير في نفاذية الخرسانة. حيث أن الخرسانات الطازجة تكون فراغاتها متصلة. ومع مرور الزمن يبدأ الجل (سليكات الكالسيوم المماهة) وهيدروكسيد الكالسيوم في ملء جزء من تلك الفراغات. ومع مرور الزمن يمكن أن يقطع الجل المتكون شبكة الفراغات المتصلة، ويقل معامل النفاذية لأقل درجة. ويتضح ذلك من جدول (2-6).

جدول رقم (2-6) تأثير عمر الخرسانة على نفاذية مونة الأسمنت  $0.51 = W/C$

عمر الخرسانة (يوم)	معامل النفاذية (متر/ثانية)
طازجة	5-10
1	8-10
3	9-10
4	10-10
7	11-10
14	12-10
28	13-10
100	16-10
240	18-10

وهناك عدة عوامل أخرى منها:

المقاس الاعتباري الأكبر للركام؛ والذي أثبتت الأبحاث أنه كلما زاد أدى ذلك لزيادة معامل نفاذية الخرسانة. وكذلك نوعمة الأسمنت؛ التي كلما زادت فإن الخرسانة تقل نفاذيتها لحسن انتشار وتوزيع الجل داخل الخرسانة. ويعتبر استخدام المواد الملدنة والمواد عالية اللدنة (Plasticizer and Super-Plasticizer) من العوامل المساعدة على تقليل نفاذية الخرسانة، حيث أنها تسمح بتخفيض نسبة الماء إلى الأسمنت. وقد أثبتت الأبحاث أن إضافة غبار السليكا بنسبة تتراوح بين 8، 12% من وزن الأسمنت يقلل من نفاذية الخرسانة. حيث أنه يتحد مع أكسيد الكالسيوم مكوناً جل. ويعمل غبار السليكا على ملء الفراغات الصغيرة، حيث إن قطر حبيبة غبار السليكا صغيرة لدرجة كبيرة جداً، كما أن دمك الخرسانة الجيد يقلل نسبة الفراغات الموجودة بالخرسانة ويحسن من كثافة الخرسانة.

### 2-2-6 اختبارات النفاذية:

وعموماً فإن معامل نفاذية الخرسانة يمكن قياسه معملياً عن طريق استخدام قانون دارسي

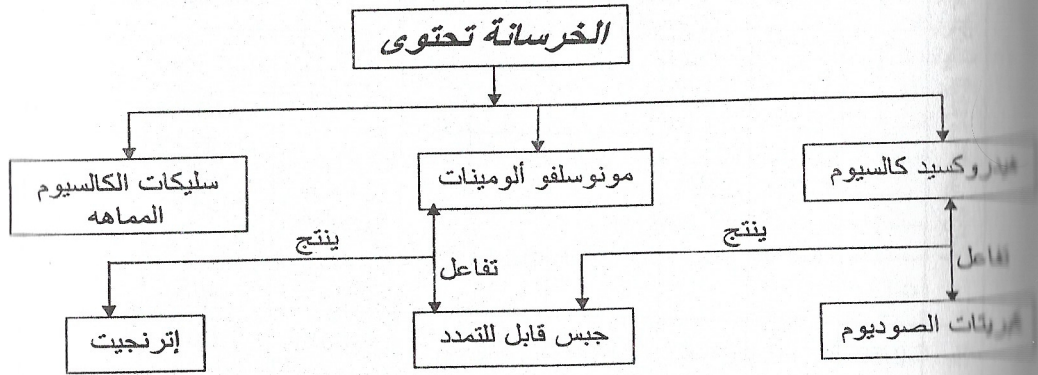
$$\text{للسريان } Q = AK \frac{H}{t}$$

حيث A مساحة مقطع العينة و K معامل نفاذية الخرسانة و H ارتفاع الماء (ضغط السائل) و t سمك العينة. ويتم الاختبار عن طريقة تعريض بلاطة بسمك صغير t من الخرسانة لضغط ماء على سطح السائل ثم يتم تجميع الماء المار.

وفي المواصفات الألمانية يحسب K بتعريض عينة خرسانية لنفاذية ماء تحت ضغط قياسي معين لفترة معينة، ثم تؤخذ عينة الخرسانة وتكسر بتحميلها في الضغط خطياً، ليحدث الفصل بها. وبفحصها بصرياً نحدد سمك اختراق الماء للخرسانة. وباستخدام نظرية الانتشار يمكن معامل نفاذية الخرسانة.



وتمثل مهاجمة كبريتات المغنسيوم حالة خاصة حيث أن تلك الكبريتات بالإضافة إلى الفعل السابق ذكره تهاجم جل الأسمنت، وتحول أجزاء منه إلى مادة غير أسمنتية. ولذلك يجب على المهندس التفريق بالتحليل الكيميائي للماء الجوفى بين الأنواع المختلفة للكبريتات.



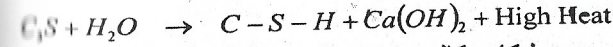
شكل رقم ( 2-6 ) نموذج لمهاجمة الخرسانة بالكبريتات

### 1-2-3-6 العوامل التي تؤدي إلى سرعة مهاجمة الكبريتات:

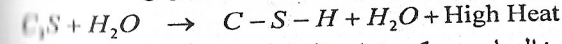
- 1- تركيز الكبريتات: كلما زاد تركيز الكبريتات في الأوساط المحيطة يزيد الفعل السلبي للكبريتات على الخرسانة. انظر جدول (3-6)، والذي يوصى به الكود المصرى للخرسانة، والذي يقسم مستوى المهاجمة حالة من ثالث أكسيد الكبريت.
- 2- تعرض الخرسانة إلى ضغط مياه كبير: قد تتعرض الخرسانة في الطبيعة إلى ضغط الماء الجوفى المحيط كما في حالة الخزانات الأرضية أو الأنفاق مما يجعل من مهاجمة الكبريتات. وفي تلك الحالة يفضل عزل تلك المنشآت عن الماء الجوفى.
- 3- تعرض الخرسانة لعمليات البلل والجفاف المتتابة: يجعل كثيراً من مهاجمة الكبريتات للخرسانة.
- 4- حركة المياه الجوفية: المياه المتحركة بسرعة تعجل من مهاجمة الكبريتات للخرسانة، حيث أنها تعمل على ذوبان بعض مكونات التفاعلات.

والمركبين الأولين لهما التأثير الرئيسى لإكساب الخرسانة اللدونة في حالتها الطازجة وإكسابها مقاومتها في الضغط والشد عندما تتصلب الخرسانة. وسنتناول فيما يلى إمالة الأسمنت:

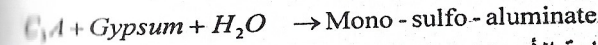
سليكات ثلاثى الكالسيوم + الماء ← سليكات كالسيوم ممالة (الجل) + هيدروكسيد الكالسيوم + حرارة عالية



سليكات ثنائى الكالسيوم + الماء ← سليكات كالسيوم ممالة + حرارة منخفضة



ألومينات ثلاثى الكالسيوم + الجبس + الماء ← كبريتات الكالسيوم الألومينية المماهة (مونوسلفو ألومينات)



مما سبق يتضح أن الخرسانة بعد إمالة الأسمنت تحتوى على هيدروكسيد الكالسيوم، وهو مادة بلورية تكسب الخرسانة وسطها القلوى الذى يحافظ على صلب التسليح بدون صدأ. وتحتوى على جل الأسمنت (C-S-H)؛ وهى المادة التى تحقق للخرسانة مقاومتها. وتحتوى كذلك على مادة مونوسلفو ألومينات (كبريتات كالسيوم ألومينية ممالة). وهذه المادة تساعد جزئياً في إكساب الخرسانة مقاومة مبكرة. بالإضافة إلى أن هذه المادة لها دور هام جداً كذلك فى مقاومة انتشار ودخول أيونات الكلوريدات من الأوساط المحيطة إلى داخل الخرسانة، فتحصى الخرسانة المسلحة من احتمال حدوث صدأ فى صلب التسليح.

### 2-3-6 مهاجمة الخرسانة بالكبريتات:

تتواجد الكبريتات فى صورة محاليل فى التربة أو الماء الجوفى أو على هيئة محاليل صناعية. ومن أمثلتها محلول كبريتات الصوديوم وكبريتات المغنسيوم وكبريتات الكالسيوم. ويمكن تلخيص مهاجمة الخرسانة بالكبريتات كما يلى:

- 1- تكون الجبس: تهاجم الكبريتات الموجودة فى الماء الجوفى هيدروكسيد الكالسيوم كما يلى: كبريتات الصوديوم (كمثال) + هيدروكسيد الكالسيوم (موجود فى الخرسانة) ← هيدروكسيد صوديوم + كبريتات الكالسيوم (جبس) ..... (10-6)
  - 2- تكون ملح الأترنجيت: هذا التفاعل يتميز أن حجمه كبير، مما يولد ضغوط داخل الخرسانة. كبريتات الكالسيوم (نتيجة من التفاعل السابق) + مونوسلفو ألومينات (موجودة فى الخرسانة) ← الأترنجيت (كبريتات كالسيوم ألومينية ممالة) ..... (11-6)
- والأترنجيت المتكون يحتوى على 32 جزء ماء فى تركيبه الكيميائى ويتميز بحجمه الكبير جداً إذا ما قورن بالمواد الداخلة فى التفاعل. وشكل (2-6) يوضح نموذج لتلك المهاجمة.

مما سبق يتضح أن وجود الكبريتات فى الأوساط المحيطة بالخرسانة يؤدي إلى تكون الجبس والأترنجيت. وهذه المواد تؤدي إلى زيادة حجم الخرسانة المتصلدة. ويمكن اعتبار أن عنصر الأترنجيت مماثل لفعل الخلايا السرطانية، حيث تتحول المواد الأسمنتية إلى مواد تؤدي إلى تفتت الخرسانة. فإذا تواجدت الكبريتات بتركيزات عالية تزيد كمية الجبس والأترنجيت المتكون وتزيد الضغوط الناشئة عن الزيادة الحجمية، مما يؤدي إلى ظهور الشروخ فى داخل الخرسانة وتفقد الخرسانة جزء من مقاومتها.



جدول (3-6) متطلبات الخرسانة المعرضة للكبريتات

الحد الأدنى للمقاومة المميزة $f_{cm}$	الحد الأقصى لنسبة الماء: الأسمنت	الحد الأدنى لمحتوى الأسمنت			نوع الأسمنت	تركيز الكبريتات فى صورة ثالث أكسيد الكبريت		
		المقاس الاعتبارى الأكبر للركام — مم				فى التربة		فى الماء الأرضى
		10	20	32		جزء فى المليون	SO <sub>3</sub> مزيج من الماء والتربة بنسبة 1: 2 جم/لتر	SO <sub>3</sub> الكلى %
-	0.52	400	400	350	بورتلاندى CEMI	300>	1.00>	0.20>
25	0.50	400	400	350	بورتلاندى أو CEMI متوسط الحرارة	-300 700	-1.00 1.50	-0.20 0.35
30	0.45	400	400	350	مقاوم للكبريتات أو متوسط الحرارة	-700 1200	-1.50 1.90	-0.35 0.50
35	0.43	450	450	400	مقاوم للكبريتات	-1200 2500	-1.90 3.10	-0.50 1.00
40	0.40	450	450	400	مقاوم للكبريتات مع تغطيات واقية مناسبة	-2500 5000	-3.10 5.60	-1.00 2.00

### 2-2-3-6-2-2-3-6 الاحتياطات اللازمة لتقليل المهاجمة بالكبريتات:

1. استخدام الأسمنت المقاوم للكبريتات: حيث أن ذلك الأسمنت يتميز بأن نسبة ألومينات ثلاثي الكالسيوم  $C_3A$  صغيرة، أي أقل من أو يساوي 3.5%. وهذه الكمية صغيرة إذا قورنت بالأسمنت البورتلاندى العادى والتي تتراوح فيه بين 8، 13%، وبالتالي تقل كمية الأترنجيت والجبس المتكونان نتيجة نقص المونوسلفو ألومينات، وبالتالي يقل تأثير الكبريتات في حالة استخدام الأسمنت المقاوم للكبريتات.

2. إضافة المواد البوزولانية للأسمنت:

يمكن للمهندس إضافة مواد بوزولانية مثل غبار السليكا أو الميتاكاولين أو الرماد الطائر (Fly Ash) إلى الخرسانة لتحسين أداء الخرسانة في حالة وجود الكبريتات. وقد اتفقت نتائج الأبحاث التي تم إجراؤها على أن استخدام المواد البوزولانية تحسن من تحمل الخرسانة لكبريتات الصوديوم، وذلك عن طريق تحويل هيدروكسيد الكالسيوم إلى جل.

مادة بوزولانية + هيدروكسيد الكالسيوم (موجود بالخرسانة) ← جل أسمنت .. (11-6)

وبالتالى يقل الجبس والأترنجيت نظراً لنقص هيدروكسيد الكالسيوم. واختلفت الأبحاث على تأثير غبار السليكا على تحمل الخرسانة المعرضة لمهاجمة كبريتات الماغنيسيوم. ومعظم تلك الأبحاث توصلت إلى أن غبار السليكا له عامل سلبي على سلوك الخرسانة في تلك الحالة. وسوف يتم تناول تأثير الإضافات المعدنية بالتفصيل في باب الإضافات.

3. استخدام خرسانة لها معامل نفاذية صغير.
4. استخدام أقل نسبة ممكنة من W/C، انظر جدول (3-6) الذى يوضح نقص W/C مع زيادة تركيز الكبريتات.
5. استخدام خرسانة ذات كثافة عالية.
6. استخدام خلطة خرسانية غنية نسبياً بالأسمنت (زيادة محتوى الأسمنت)، انظر جدول (3-6).
7. المعالجة بالبخار.
8. المعالجة السطحية من الخارج لتقليل النفاذية.

### 4-6 ظاهرة الكربنة والإزهار (Carbonation and Efflorescence):

يوجد ثنائي أكسيد الكربون في الأجواء المحيطة بالخرسانة. ويبدأ هذا الغاز في النفاذ داخل الخرسانة ويهاجم الخرسانة كما يلي:

ثنائي أكسيد الكربون + هيدروكسيد الكالسيوم (موجود بالخرسانة) ← كربونات كالسيوم + ماء

وهذا الملح غير قابل للذوبان في الماء لكنه يتفاعل مع ثنائي أكسيد الكربون كما يلي:

كربونات كالسيوم + ثنائي أكسيد الكربون ← بيكربونات كالسيوم..... (13-6)

وملح بيكربونات الكالسيوم قابل للذوبان في الماء، حيث يذوب ويتم خروجه من على سطح الخرسانة نتيجة الأمطار أو الماء الجوفى. وإذا تجمع الملح سواء كربونات الكالسيوم أو بيكربونات الكالسيوم مكوناً بقع بيضاء على السطح الخارجى للخرسانة، يسمى ذلك بظاهرة الإزهار (Efflorescence).

وقد يسلك تفاعل ثنائي أكسيد الكربون طريقاً آخر كما يلي:

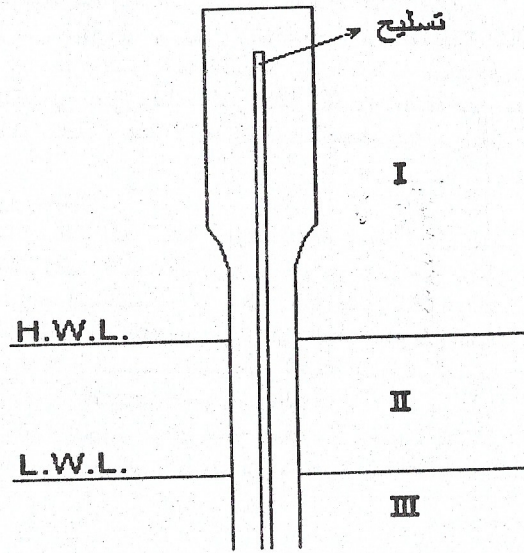
ثنائي أكسيد الكربون + ماء (بالخرسانة) ← حمض كربونيك..... (14-6)

حمض كربونيك + هيدروكسيد كالسيوم ← كربونات كالسيوم + ماء.... (15-6)

وكربونات الكالسيوم تتحول كما سبق ذكره إلى بيكربونات الكالسيوم.

مما سبق يتضح أن ظاهرة الكربنة هي تحول هيدروكسيد الكالسيوم إلى مادة أخرى هي كربونات الكالسيوم أو بيكربونات الكالسيوم، وبالتالي تقل قلوية الخرسانة (PH) فكلما استخدم المهندس خرسانة جيدة، W/C منخفضة يقل سمك الخرسانة الخارجى الذى يحدث به كربنة وإذا استخدم خرسانة غير كثيفة و W/C عالية (0.7) يحدث كربنة لجميع خرسانة الغطاء الخرساني ويدخل ثنائي أكسيد الكربون للداخل ويزيد معدل الصدأ.





شكل (3-6) نموذج لمهاجمة الخرسانة بماء البحر

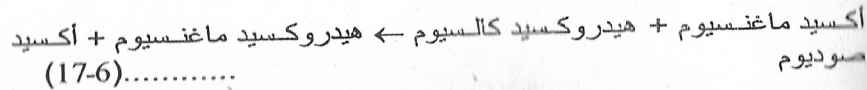
#### 2-6-6 المهاجمة الكيميائية:

يتميز ماء البحر بوجود نسبة عالية جداً من أملاح الكلوريدات ونسبة عالية من أملاح الكبريتات وأملاح الماغنسيوم.

#### 1-2-6-6 تأثير الكبريتات :

أولاً من المنشآت البحرية والأبحاث أن تأثير أملاح الكبريتات الموجودة في ماء البحر أقل من تأثير أملاح الكبريتات الموجودة في الماء الجوفى. ويمكن تلخيص هذا الفعل كما يلي:

• تهاجم أملاح الكبريتات الخرسانة ويتكون الجبس وملح الأترنجيت، كما سبق ذكره في مهاجمة الخرسانة بالكبريتات. ولكن لوحظ أن التمدد يكون قليل. وأرجع العلماء ذلك لوجود أملاح الكلوريدات بتركيز عالى، والتي تعمل على ذوبان كمية كبيرة من الأترنجيت المتكون وبالتالي يقل الضرر. كما لوحظ أن معدلات التفاعل بين الكبريتات والخرسانة تقل نتيجة وجود ملح البروسيت، والذي يتكون من اتحاد عنصر الماغنسيوم الموجود بماء البحر مع سطح الخرسانة الخارجى كما يلي:



• وملح هيدروكسيد الماغنسيوم (بروسيت) هو ملح نفاذيته منخفضه جداً. ويعتبر مادة عازلة مكونة على سطح الخرسانة الخارجى، مما يصعب دخول محلول الكبريتات إلى داخل الخرسانة لمهاجمتها.

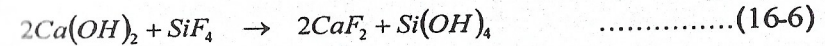
#### 5-6 المهاجمة بالأحماض (Acid Attacks):

تتواجد أبخرة الأحماض مثل ثانى أكسيد الكربون ( $\text{CO}_2$ ) وثانى أكسيد الكبريت ( $\text{SO}_2$ ) في الأجواء المحيطة بالخرسانة. فيسبب إذابة وإزالة جزء من الأسمنت الذى شك (عن طريق إذابة هيدروكسيد الكالسيوم). ويحدث ذلك في المداخل وأنفاق السكك الحديدية. وعموماً لا يوجد أسمنت مقاوم للأحماض، وإنما يتم أخذ احتياطات لتقليل هذا التآكل. ويمكن اللجوء للخرسانة البوليمرية في تلك الحالة. ويمكن تقسيم مهاجمة الماء الحامض للخرسانة طبقاً لـ DIN 4030 كما بجدول (4-6).

جدول (4-6) أنواع المهاجمة بالماء الحامض

الماء الحامض		درجة المهاجمة
$\text{CO}_2$ جزء في المليون	PH	
30-15	6.5-5.5	ضعيف
60-30	5.5-4.5	قاسى
60<	4.5>	قاسى جداً

وفي شبكات الصرف الصحى تتحول مركبات الكبريت (Sulfur Compounds) بواسطة البكتيريا اللاهوائية إلى كبريتيد الهيدروجين، الذى يتأكسد بواسطة البكتيريا الهوائية للأجزاء الغير مغمورة بالماء، ويتحول إلى حمض الكبريتيك (Sulfuric Acid)، الذى يهاجم تلك الشبكات الخرسانية ويحدث لها تآكل وتحلل. ويمكن تحسين مقاومة الخرسانة للأحماض وذلك بمعالجة الخرسانة بسليكات الصوديوم الذى يتحد مع هيدروكسيد الكالسيوم، وتتكون سليكات الكالسيوم التى تقلل النفاذية. وفي حالة الخرسانة سابقة الصب يمكن تحسين مقاومتها للأحماض عن طريق حمايتها بواسطة تعرضها للتفريغ بواسطة غاز Silicon Tetra-Fluoride، الذى يتفاعل مع الجير وينتج مادة غير منفذة.



#### 6-6 مهاجمة الخرسانة بماء البحر:

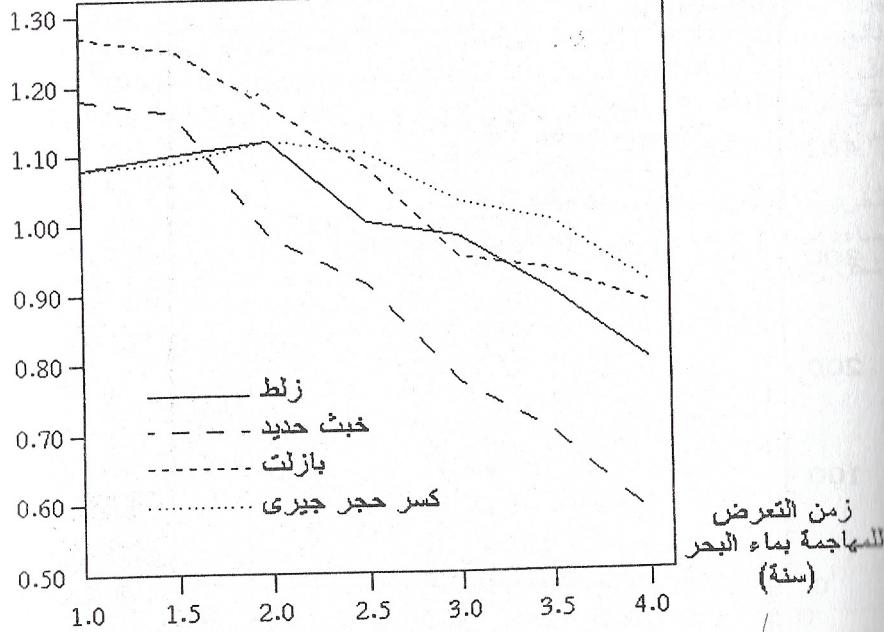
##### 1-6-6 عام:

النموذج المبين بشكل (3-6) يوضح أحد المنشآت البحرية، مثل حواجز الأمواج أو الأرصفة. ويوضح عليه مناطق التأثير بماء البحر، حيث تنقسم إلى ثلاثة مناطق. المنطقة الأولى هي المنطقة التى تكون دائماً أعلى من ماء البحر. والمنطقة الثانية هي المنطقة التى تقع بين أعلى منسوب لماء البحر وأدنى منسوب لماء البحر. والمنطقة الثالثة هي المنطقة التى تكون مغمورة دائماً تحت ماء البحر. وسنتناول فيما يلي كيفية مهاجمة المناطق الثلاثة.

- المنطقة الأولى (I): تهاجم تلك المنطقة كيميائياً بماء البحر المتصاعد إلى أعلى بالخاصية الشعرية أو بالأمواج العالية، وتهاجم ميكانيكياً بالبال والجفاف والأمواج العالية وصدأ صلب التسليح.
- المنطقة الثانية (II): تهاجم تلك المنطقة كيميائياً بماء البحر، وميكانيكياً بالأمواج وما تحمله من عوالق مثل الرمال وغيرها. وتهاجم ميكانيكياً أيضاً بتكون الثلج وذوبانه في المناطق الباردة، كما تهاجم بالتفاعل القلوى للركام أو بصدأ صلب التسليح.
- المنطقة الثالثة (III): تهاجم تلك المنطقة كيميائياً بماء البحر.



### مقاومة الضغط النسبية



شكل (4-6) تأثير نوع الركاب على تحمل الخرسانة لماء البحر

وربما يعود أفضلية الحجر الجيري لأن معامل التمدد الحرارى له أقل من الزلط بالإضافة إلى تحسن مقاومة الترابط.

وقد تم دراسة تأثير فترة المعالجة قبل صب أو تنزيل الخرسانة لماء البحر. وشكل (5-6) يوضح دراسة فترة المعالجة. وهذا الشكل يوضح أن أقل تمدد كان بعد فترة معالجة قدره 15 دقيقة، أى عند صب الخرسانة فى ماء البحر. وكان أكبر تمدد عند تعريض الخرسانة لماء البحر بعد 28 يوم من الصب. وربما يعود سبب قلة التمدد فى الخرسانة التى يتم صبها فى ماء البحر إلى بدء تكون البروسيت مبكراً فى داخل الخرسانة.

وأثبت الفحص للمنشآت البحرية والتصوير تحت الماء الذى قام به المؤلف لبعض المنشآت البحرية مثل رصيف حوض البترول بميناء الإسكندرية، أن المنطقة الثالثة المغمورة هى أقل المناطق تأثراً، لوجود ملح هيدروكسيد الماغنسيوم. أما المنطقة الثانية فهى أشد المناطق تأثراً، نظراً لتأثير الأمواج الديناميكي على سطح الخرسانة وتكسير طبقة ملح هيدروكسيد الماغنسيوم، مما يعجل من مهاجمة الخرسانة. وهذا الاستنتاج تم التوصل إليه من قبل جميع الأبحاث السابقة.

### 2-2-6-6 مهاجمة الكلوريدات:

يتوقف تأثير الكلوريدات على الخرسانة، على طبيعة المنشأ؛ هل المنشأ من خرسانة عادية أم من خرسانة مسلحة. فينقسم تأثير ملح الكلوريدات الموجود فى ماء البحر أو الملاحات إلى تأثير على الخرسانة وتأثير على صلب التسليح. والتأثير الكيميائى للكلوريدات يتمثل فى تأثيره على الخرسانة العادية التى يتم صبها فى ماء البحر أو فى الماء الجوفى المحتوى على نسبة عالية من الكلوريدات، حيث تؤثر أملاح الكلوريدات على كمية الجل وترتيبه. مما يقلل من مقاومة الضغط بعد 28 يوم، بالرغم من تحسينه المقاومة المبكرة. ويجب على المهندس أخذ ذلك فى الاعتبار عند تصميمه للخلطة. بحيث ترفع قيمة المقاومة المميزة لتلاشى هذا النقص. أما تأثير الكلوريدات على صلب التسليح، فسيتم مناقشته فى ظاهرة صدأ صلب التسليح التى سنتناولها فى البند (7-6).

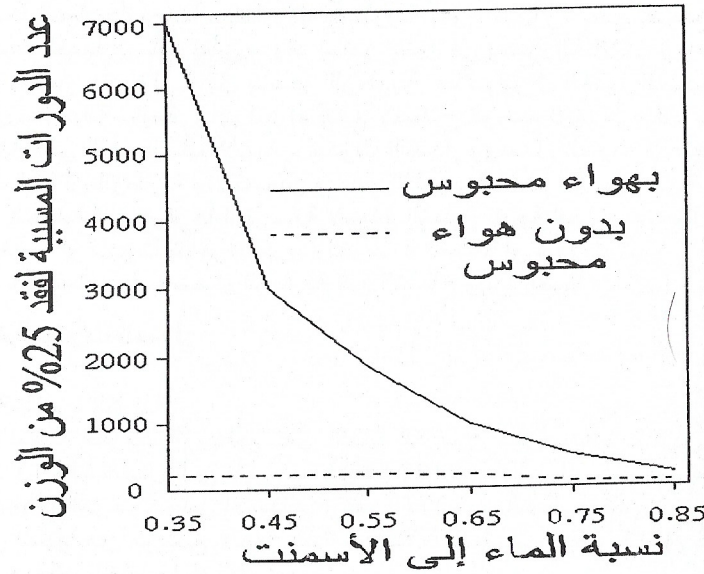
### 3-2-6-6 تأثير عوامل أخرى على مهاجمة ماء البحر للخرسانة:

وقد قام المؤلف بعمل دراسة حقلية، قام خلالها بفحص كتل حماية الشواطئ المستخدمة لحماية شاطئ الإسكندرية من الأمواج، وكذلك بعض المنشآت الأخرى. وأثبتت الدراسة أن استخدام كسر الحجر الجيري فى الخرسانة المعرضة لماء البحر كركام كبير أعطى سلوكاً أفضل من سلوك الزلط والبازلت. وأثبتت الدراسة العملية هذه النتيجة، كما هو واضح فى شكل (4-6).



3- العوامل التي تعتمد عليها مقاومة الخرسانة للصقيع:  
يلزم أن تكون نسبة W/C منخفضة جداً، بحيث تحتوى العجينة على فراغات غير شعرية، وبالتالي تقل كمية الماء التي يمكن أن تتجمد. ويجب أن تتحقق درجة إمالة كافية للأسمنت، عن طريق الاهتمام بالمعالجة قبل تعرض الخرسانة للصقيع. ويلزم الدمك الجيد للخرسانة لمقاومة الصقيع. ولا يؤثر التركيب الكيميائي للأسمنت ولا نعومته على مقاومة الخرسانة للصقيع، إلا في الأيام الأولى، حيث يؤثر هذين العاملين على درجة الإمالة.

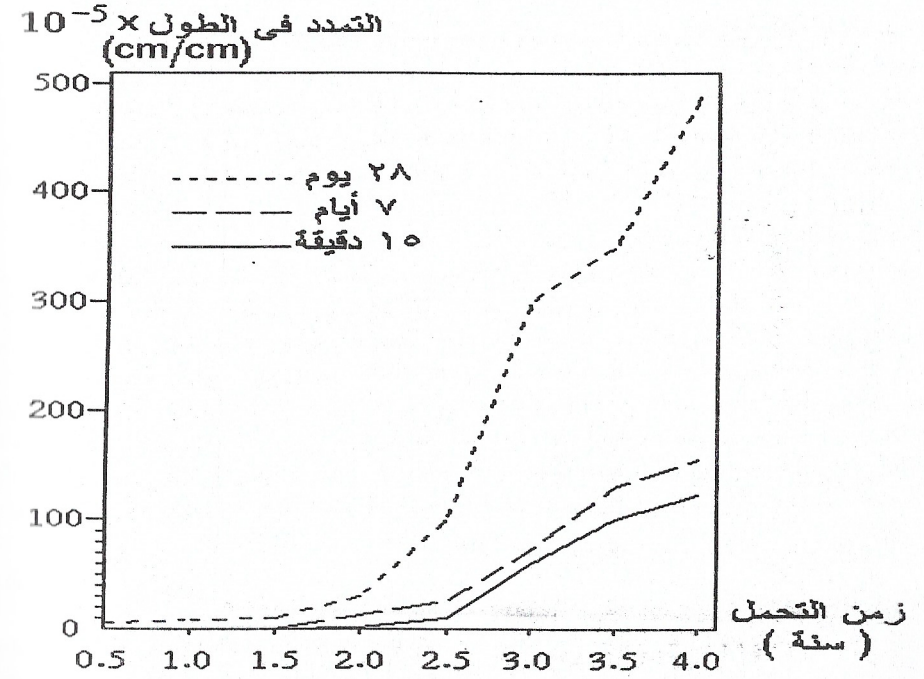
4- الخرسانة ذات الهواء المحبوس:  
يساعد الهواء المحبوس على زيادة مقاومة الخرسانة للتحلل بواسطة الصقيع. ويتضح ذلك من شكل (6-6).



شكل (6-6) تأثير وجود الهواء المحبوس على تحمل الخرسانة للصقيع

ويؤثر الهواء المحبوس على خواص الخرسانة الأخرى، حيث أنه لكل زيادة 1 % في الهواء المحبوس ينقص معايير الكسر بمقدار 2-3 %، وتقل مقاومة الضغط بمقدار 3-5 %، ومعايير المرونة يقل بمقدار 3 %.

ويزيد الهواء المحبوس من تشغيلية الخرسانة الطازجة. ويظهر ذلك عند إضافة 5 % هواء محبوس، حيث يزيد معامل الدمك بمقدار 0.03-0.07. ويزيد الهبوط بمقدار 1-5 %. كما أن الهواء المحبوس يقلل احتمال النزيف.



شكل (5-6) تأثير فترة المعالجة على التمدد الناتج من ماء البحر

#### 4-2-6-6 تأثير الصقيع على الخرسانة:

يعرف الصقيع بأنه تحول الماء بداخل الخرسانة إلى ثلج وبالتالي يزيد حجمه عن حجمه الأصلي.

##### 1- تأثير الصقيع على الخرسانة الطازجة:

إذا حدث صقيع للخرسانة قبل أن تشك، فإن ماء الخلط سوف يتجمد ويحدث زيادة ملحوظة في حجم الخرسانة وتأخير كبير في زمن الشك والتصلد للخرسانة. وإذا استمرت الخرسانة في درجة الحرارة المنخفضة، فسوف تستمر عملية عدم شكها. فإذا حدث بعد ذلك ذوبان للثلج المتكون، فإنه يلزم دمك الخرسانة جيداً ثم بعد ذلك يحدث شك وتصلب لها بدون فقد في المقاومة. ولا ينفذ ذلك إلا في الخرسانة الغير إنشائية.

##### 2- تأثير الصقيع على الخرسانة المتصلدة:

إذا انخفضت درجة حرارة الخرسانة المتصلدة، فإن الماء الموجود في الفراغات الشعرية داخل الخرسانة سوف يتجمد، ويحدث زيادة في الحجم ينتج عنه إجهادات داخلية. إذا تم ذوبان للجليد بعد ذلك مع زيادة درجة الحرارة، فسوف تتلاشى تلك الإجهادات للخرسانة. وإذا تكررت العملية مرات عديدة سوف تظهر شروخ، وتبدأ الخرسانة في فقد جزء من مقاومتها. ومما هو جدير بالذكر أن الفراغات الكبيرة الموجودة في داخل الخرسانة الناتجة من قوالب غير كامل، تكون مملوءة بالماء ولا تتأثر كثيراً بالصقيع.



## 7-6 صدأ صلب التسليح:

### 1-7-6 عام:

إن ظاهرة صدأ صلب التسليح هي الأكثر انتشاراً في الإسكندرية وفي المدن الساحلية وكذلك بدرجة أقل في المدن الأخرى. ويرجع معظم أسباب التصدع في المنشآت الخرسانية ونقص عمرها الافتراضي لصدأ الصلب. وتعتبر الخرسانة المسلحة من المواد ذات التحملية العالية وتعيش منشأتها طويلاً، ويفضلها المصممون على كثير من أنواع المواد الأخرى. وقد يكون الصدأ بسيطاً ويظهر في صورة شروخ دقيقة عند أسياخ التسليح. وقد يزيد تأثير الصدأ فيؤدي إلى تساقط الخرسانة المكونة للغطاء الخرساني (Spalling of Concrete Cover). وقد يصل الصدأ لدرجة كبيرة فتتخفف مساحة أسياخ التسليح وتزيد الإجهادات زيادة كبيرة مما يؤدي إلى حدوث انهيار للعضو الخرساني.

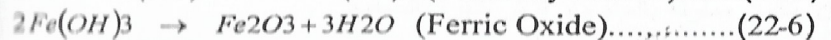
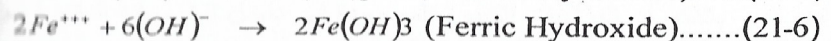
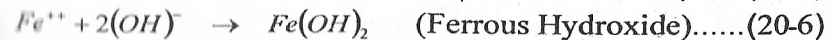
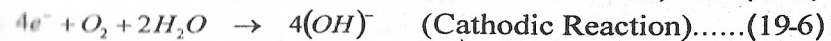
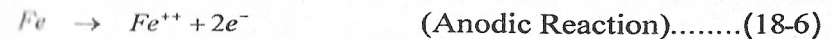
وخطورة صدأ الصلب أنه يبدأ ويستمر لمدة طويلة بدون ظهوره على السطح. وذلك لأن التدهور المصاحب لصدأ الصلب بطيء، وقد يستمر سنين في بعض الحالات. وخطورته أيضاً أنه طالما بدأ فسيستمر حتى ولو أزيل مصدر الرطوبة، ما لم يزال الحديد الصدأ والخرسانة المعيبة وتستبدل بخرسانة سليمة. وأى إجراء يُتبع لإصلاح الوضع المتدهور لخرسانة أصابها الصدأ يعتمد كلية على الفهم السليم لأسباب حدوث الصدأ، ووسائل السيطرة عليه ومنعه من الاستمرار. والحقيقة أن الرطوبة والأكسجين و ملح الكلوريدات هم أساس عملية الصدأ التي تبدأ حينما تنفقد الحماية التي توفرها الخرسانة لأسياخ التسليح نتيجة أسباب عدة مثل؛ زيادة نسبة الكلوريدات بالخلطة أو حدوث ظاهرة الكربنة لخرسانة الغطاء أو حدوث شروخ نتيجة أسباب أخرى غير الصدأ، مما يسهل وصول الرطوبة إلى الأسياخ ويبدأ الصدأ.

## 2-7-6 ميكانيكية حدوث الصدأ:

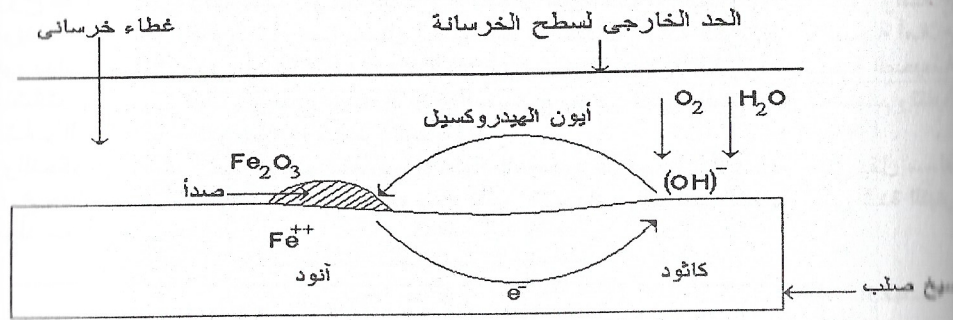
### أ - الصدأ نتيجة ظاهرة الكربنة:

نتيجة زيادة نفاذية الخرسانة، يهاجم ثاني أكسيد الكربون الخرسانة كما سبق ذكره، وتقل نسبة PH من 13 إلى 9. وقد تصل إلى 9. ومع خفض PH، يبدأ الصلب في فقد طبقة الحماية (Passive layer) الموجود على الأسياخ. ونظراً لأن سبيخ الصلب يتكون من عدة أكاسيد يصعب تطابق نسبها من موضع لآخر، يبدأ حدوث مناطق أنودية ومناطق كاثودية، كما بالشكل (7-6). ويمكن تلخيصها كما يلي:

1. يتأين الصلب عند الأنود وينطلق منه إلكترونات تتجه للكاثود، ويتبقى الحديد على هيئة أيون موجب.
2. تنطلق الإلكترونات للكاثود، وتتحد مع الماء والأكسجين الموجودين في الخرسانة مكونة أيون الهيدروكسيل (OH<sup>-</sup>).
3. يتحد أيون الهيدروكسيل مع أيون الحديد في سلسلة من التفاعلات، وينتج عنها الصدأ، وهو أكسيد الحديد. ويمكن تلخيص تلك الظاهرة في المعادلات الكيميائية التالية:



وأكسيد الحديد (صدأ الصلب) يتميز بأن حجمه كبير جداً، بالنسبة لحجم الحديد الأصلي (حوالي 6 مرات أو أكثر). مما يولد ضغوط على خرسانة الغطاء الخرساني، مما قد يولد شروخ في الخرسانة المحيطة. بالإضافة إلى فقد جزء من صلب التسليح، وتحوله إلى مادة ضعيفة. ويوجد عامل سلبى آخر لظاهرة الصدأ، وهو فقد جزء من مقاومة الترابط بين الخرسانة وصلب التسليح. ويحدث ذلك في مراحل الصدأ التي تؤدي إلى ظهور شروخ حول الأسياخ.

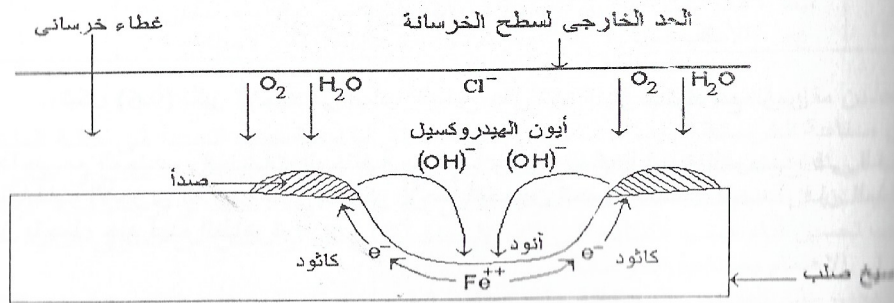


شكل (7-6) نموذج صدأ صلب التسليح في حالة ظاهرة الكربنة

### ب - الصدأ نتيجة أملاح الكلوريدات:

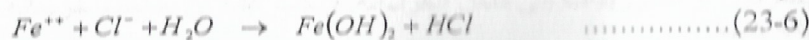
قد توجد أملاح الكلوريدات في الرمل أو الركام الكبير المستخدمان في الخرسانة. وقد تتوفر تلك الأملاح من الأوساط المحيطة بالخرسانة مثل؛ الماء الجوفى أو الملاحات أو ماء البحر أو في التربة السبخة.

إن وجود أملاح الكلوريدات مع الماء الموجود بداخل الخرسانة يسبب وجود حمض الهيدروكلوريك، الذي يفقد الخرسانة قوتها بمعدل سريع ويدمر طبقة الحماية ويعجل من صدأ صلب التسليح. ولذلك تتعدد المناطق الكاثودية، ويحدث تآكل سريع في صلب التسليح في مكان واحد (Pitting Corrosion)، كما هو مبين بشكل (8-6).

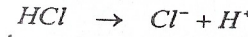


شكل (8-6) نموذج للصدأ في حالة وجود نسبة عالية من الكلوريدات

ومن رحمة الله بنا أنه أوجد تفاعل آخر يتم بجانب التفاعل السابق، وهو التفاعل الموضح في المعادلات التالية:





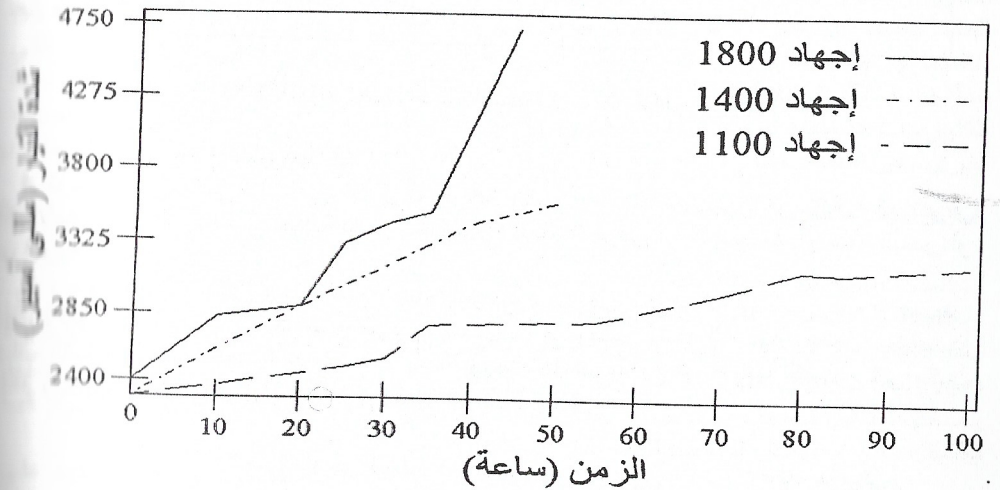


(24-6).....

وهذا التفاعل ينشط الصدا في البداية. لكن مع تراكم غاز الهيدروجين حول الكاثود يبدأ معدل الصدا في النقصان، مما يبطئ من عملية الصدا. وإلا كانت المنشآت الخرسانية المسلحة تفقد صلب تسليحها في فترة وجيزة جداً و يحدث بها انهيار.  
ج- الصدا نتيجة وجود شروخ بالخرسانة المسلحة:

مما هو معلوم عند تصميم المنشآت الخرسانية المسلحة، فإن مناطق الشد تسمح بوجود شروخ دقيقة غير مرئية بها. وهذه الشروخ تعجل من اختراق الماء والأكسجين وأصلاح الكلوريدات إلى داخل الخرسانة، مما يعجل الصدا سواء أحدثت نتيجة الكربنة، أو نتيجة أصلاح الكلوريدات. ولذلك يجب أن يتناسب سمك الشرخ المسموح به مع الظروف البيئية المحيطة بالمنشآت. والجدول التالي يوضح سمك الشرخ المسموح به في الكود المصري لتصميم وتشييد المنشآت الخرسانية والموصى به لبعض المناطق.

وللتحكم في سمك الشرخ يجب تخفيض الإجهاد الموجود في صلب التسليح حتى يقل سمك الشرخ ويقل معدل الصدا. وشكل (9-6) يوضح تأثير الإجهاد في صلب التسليح على شدة التيار المتولد مع الزمن.



شكل (9-6) تأثير الإجهاد في صلب التسليح على شدة التيار المتولد مع الزمن

وإذا صمم المهندس المنشآت المختلفة محافظاً على سمك الشرخ الموضح في الجدول والاحتياطات الأخرى اللازمة التي ستذكر لاحقاً لتحسين تحمل الصلب للصدا، فإن المنشآت ستميز بتحمل جيد لهذه الظاهرة.

جدول (6-6) سمك الشرخ المسموح به للمنشآت الموجودة في بيئات مختلفة .

مسلسل	درجة تعرض سطح الشد للعوامل البيئية	سمك الشرخ المسموح به مم
1	العناصر التي أسطح الشد بها محمية: وهذه العناصر تشمل: أ- جميع العناصر الداخلية المحمية في المنشآت العادية كالمباني. ب- العناصر المغمورة بصفة دائمة أسفل المياه التي لا تحتوى على مواد ضارة أو في حالة جفاف دائم. ج- الأسقف النهائية المعزولة جيداً ضد الرطوبة والأمطار.	0.30
2	العناصر التي أسطح الشد بها غير محمية: وهذه العناصر تشمل: أ- جميع المنشآت في العراء مثل الكبارى والأسقف غير المعزولة عزلاً جيداً. ب- منشآت القسم الأول المجاورة للشواطئ. ج- العناصر المعرضة أسطحها للرطوبة، نظراً لعدم إمكان إبعادها عن تأثيرها مثل الصالات المفتوحة أو الجراجات.	0.20
3	العناصر التي أسطح الشد بها معرضة لعوامل ضارة: وهذه العناصر تشمل: أ- العناصر المعرضة لنسبة رطوبة عالية. ب- العناصر المعرضة إلى حالات متكررة من التشبع بالرطوبة. ج- خزانات المياه. د- المنشآت المعرضة لأبخرة وغازات ومواد كيميائية ذات تأثير غير شديد.	0.15
4	العناصر التي أسطح الشد بها معرضة لعوامل ذات تأثيرات مؤكسدة وضارة تسبب صدا الصلب: وهذه العناصر تشمل: أ- العناصر المعرضة لعوامل ذات تأثير مؤكسد ضار يسبب صدا الصلب بما في ذلك الأبخرة والغازات التي تحتوى على كيميائيات وغيرها. ب- الخزانات الأخرى والمجارى والمنشآت المعرضة لماء البحر. ج- الأسقف النهائية الغير معزولة جيداً ضد الرطوبة والأمطار.	0.10

لحسن مقاومة صدا صلب التسليح:

إن صناعة الخرسانة الجيدة -كما سبق ذكره- تحقق مقاومة جيدة للصدا في حالة المنشآت القائمة في الظروف العادية. ولكن في حالة تعرض الخرسانة لأوساط بها محتوى عالى من الكلوريدات مثل؛ الخرسانة المسلحة الموجودة في ماء البحر أو ملاحات أو تربة سبخة، فإنه من الواجب تحسين أداء صلب التسليح في تلك الأوساط باتباع كل أو بعض من الطرق التالية:

أ. الاهتمام بصناعة الخرسانة:

يجب على المهندس المحافظة على احتفاظ الخرسانة بقلوبتها، لأن الخرسانة ذات القلوية العالية لا يحدث بها صدا، ويتضح ذلك من شكل (6-10). وهذا الشكل يوضح بجلاء أنه كلما كانت قلوية الخرسانة أكبر من أو يساوى 13، فإن معدل الصدا يكون قليل جداً أو معدوم، فيجب على المهندس تخفيض نسبة الماء إلى الأسمنت، حتى يقلل نفاذية غاز ثاني أكسيد الكربون أو الكلوريدات إلى داخل الخرسانة. ويجب عليه أن يستخدم خرسانة غنية وخرسانة كثيفة.

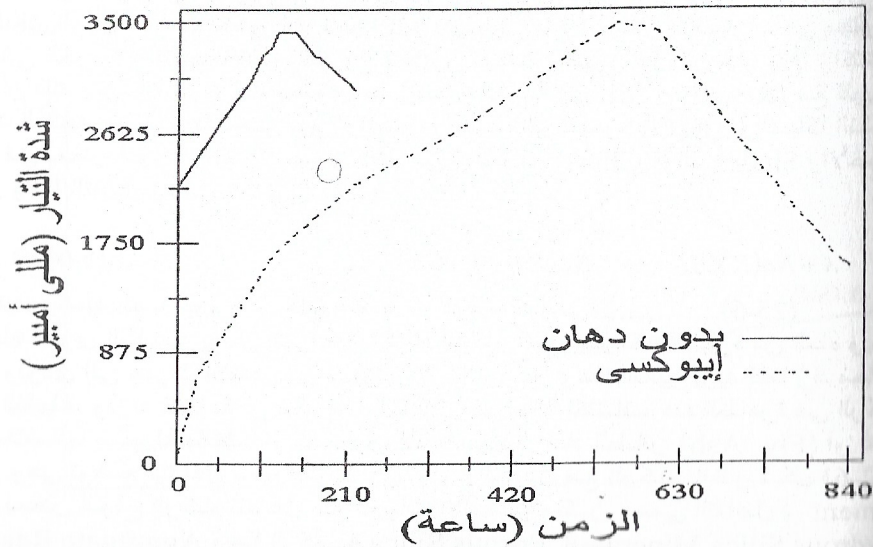


جدول (7-6) الحد الأدنى لسمك الغطاء الخرساني .

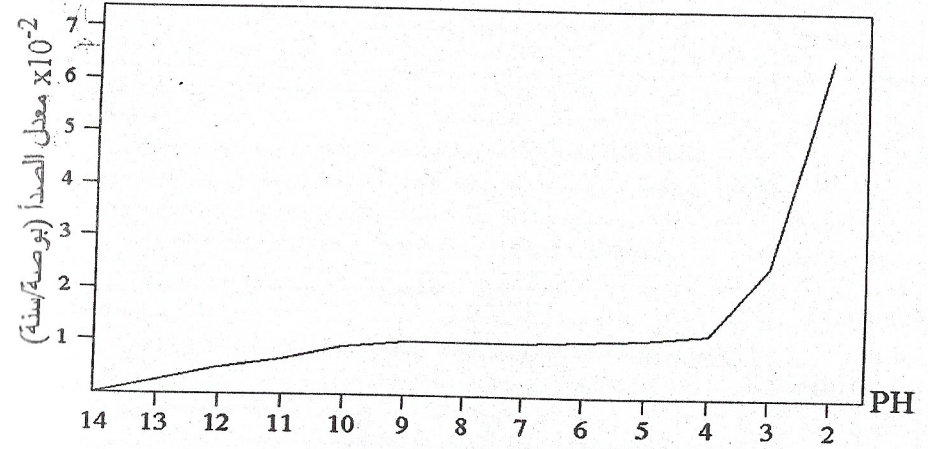
سمك الغطاء الخرساني * (مم)				قسم تعرض سطح الشد
الحوائط والبلاطات المصمتة		عام لجميع العناصر عدا الحوائط والبلاطات المصمتة		
$F_{cu}^{**}>25$	$F_{cu}^{**}\leq25$	$F_{cu}^{**}>25$	$F_{cu}^{**}\leq25$	
20	20	20	25	عناصر التي أسطح الشد بها محمية
20	25	25	30	عناصر التي أسطح الشد بها غير حميه
25	30	30	35	عناصر التي أسطح الشد بها معرضة هو امل ضارة
35	40	40	45	عناصر التي أسطح الشد بها معرضة هو امل ذات تأثيرات مؤكدة وضارة بسبب صدأ الصلب

##### 5. دهان صلب التسليح:

يتم دهان صلب التسليح بدهانات تحسن الأداء لمقاومة الصدأ مثل الإيبوكسي والإيبوكسي الغني بالزنك. وشكل (11-6) يوضح أن دهان صلب التسليح بالإيبوكسي يقلل كثيراً من شدة التيار في البداية، ويزيد الزمن اللازم لحدوث شرخ معين إذا ما قورن بالأسياخ الغير مدهونة بالإيبوكسي. وأثبتت الأبحاث أن استخدام الإيبوكسي في المناطق التي تتعرض لدورات من البلل والجفاف غير مفضل لحدوث تقشير بالدهان. ويستخدم الآن أيضاً الإيبوكسيات الغنية بالزنك.



شكل (11-6) تأثير دهان صلب التسليح على شدة التيار المتولد مع الزمن



شكل (10-6) تأثير PH على معدل صدأ الصلب

- استخدام نوع أسمنت مناسب للمهاجمة:  
ففي حالة تعرض الخرسانة المسلحة لمهاجمة الكلوريدات بنسبة عالية، يجب استخدام أسمنت عالي الخبث أو أسمنت بورتلاند عادي. أما في حالة تعرض الخرسانة المسلحة لمهاجمة مزدوجة من الكلوريدات والكبريتات مثل ماء البحر أو الملاحات أو التربة السبخة، فينصح باستخدام الأسمنت عالي الخبث أو أي أسمنت آخر بشرط أن تتوافر فيه نسبة ألومينات ثلاثي الكالسيوم بنسبة تتراوح بين 5: 8%. وكلما زادت هذه النسبة يكون ذلك مفضلاً، حيث أثبتت الأبحاث أنه كلما زادت نسبة  $C_3A$  تحسن مقاومة الصدأ.
- استخدام رمل وزلط وماء وإضافات بها أقل نسبة كلوريدات ممكنة:  
ويمكن غسل الركام في تلك الحالة، بحيث لا تزيد نسبة الكلوريدات القابلة للذوبان في الماء بالخرسانة على 0.1% من وزن الأسمنت.
- زيادة الغطاء الخرساني لصلب التسليح:  
في حالة زيادة احتمالات الصدأ، يجب ألا يقل سمك الغطاء الخرساني عن 50 مم للخرسانة المغمورة والخرسانة المعرضة للهواء الجوي، ولا يقل سمك الغطاء عن 70 مم للخرسانة المعرضة للبلل والجفاف.
- وكما زاد الغطاء الخرساني حول صلب التسليح، يكون وصول ثاني أكسيد الكربون أو الكلوريدات المحيطة إلى صلب التسليح أو بالقرب منه بطيء، وخاصة إذا كان هذا الغطاء مصنوع من خرسانة جيدة. وينص الكود المصري للمنشآت الخرسانية على استخدام الجدول التالي (جدول 7-6) لتحديد سمك الغطاء الخرساني للمنشآت في الظروف المختلفة.



## 8-6 طرق معالجة السطح الخارجي للخرسانة ضد الرطوبة:

1. الدهان بالمحاليل الأسفلتية مثل البيتومين المؤكسد، والذي يستخدم والخرسانة جافة وهو يستخدم غالباً لدهان الأساسات.
  2. الدهان بالمحاليل الأسمنتية الأساس التي تحتوى على الكوارتز وغبار السليكا وغيرها من الإضافات، حيث يتم دهان الأسطح الخرسانية به. وهى مفيدة فى حالة وجود رطوبة بالخرسانة أو بالأجواء المحيطة.
  3. لصق ألواح من الـ PVC.
  4. لصق نسيج من الأنسومات (نسيج من الكتان مشبع بالبيتومين المؤكسد).
- ويجب على المهندس التعرف على الإمكانيات المتاحة فى سوق العمل واستخدام أفضلها.

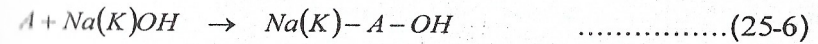
## 9-6 التفاعل القلوى للركام (Alkali Aggregate Reaction):

من البديهي أنه من المفضل ألا يتفاعل ركام الخرسانة مع وسط الخرسانة أو مع المواد المهاجمة للخرسانة، حتى لا يحدث تمدد والخرسانة متصلده، مما يعرضها للخطر إذا كانت تلك التمددات عالية.

بعد إنشاء بعض المنشآت الخرسانية مثل بعض الكبارى فى بعض مناطق العالم مثل ولاية نبراسكا وومنج الغربية ونفق الشهيد أحمد حمدي بمنطقة قناة السويس، لوحظ ظهور شروخ بتلك المنشآت. وأرجع العلماء بعض من هذه الشروخ إلى ظاهرة تفاعل ركام الخرسانة مع قلويات الأسمنت. وسوف نلخص فى ما يلى أنواع التفاعل القلوى المختلفة.

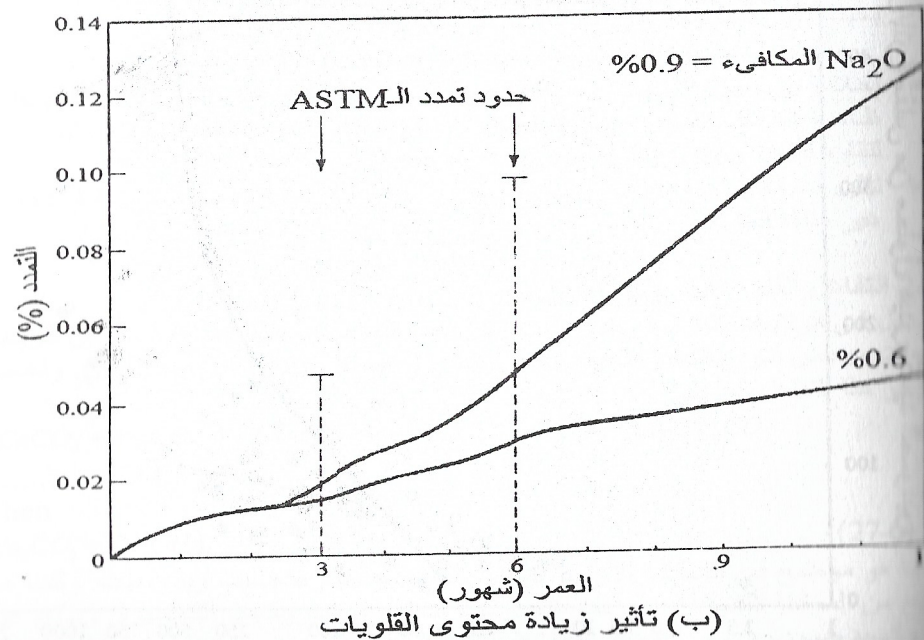
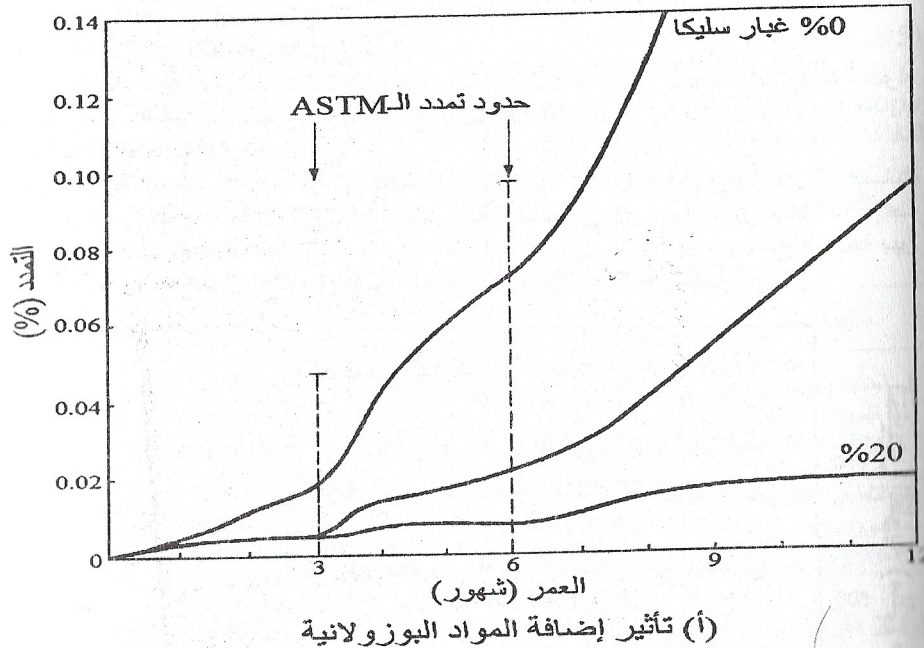
### 1-9-6 التفاعل القلوى السليسي (Alkali Silica Reaction):

حدث فى الولايات المتحدة فى الفترة من 1920 وحتى 1940 بعض الانهيارات فى مجموعة من المباني الخرسانية نتيجة انتشار الشروخ وظهور تقنات وظهور چل من الشروخ. واكتشف العلماء أن ذلك يعود لتفاعل ركام يحتوى على سيلكا نشطة (Reactive Silica) مع قلويات الأسمنت الناتجة من أكسيد الصوديوم ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) وأكسيد البوتاسيوم ( $\text{K}_2\text{O}$ ). والسيلكا النشطة وجدت فى بعض أنواع الحجر الجيري السليسي والشرت (Chert) والـ Shales والأحجار الرملية. وهذا التفاعل يحدث كما يلى:



هيدروكسيد الصوديوم + (ركام) ← چل-قلوى-سليسي ..... (25-6)

والجل القلوى السليسي يؤدي إلى تدمير تكامل الركام، ثم يمتص كمية كبيرة من الماء ويزيد حجمه، ويؤدي إلى حدوث التمدد الذى قد يؤدي إلى التشريح. وهذا التأثير يزداد كلما زاد محتوى السليكا النشطة، ويزيد كلما نقص قطر هذه السليكا. وفي حالة اكتشاف هذه الظاهرة فى الركام يمكن ملاشاتها بسهولة باستخدام مادة بوزولانية مثل الرماد الطائر (Fly Ash) أو غبار السليكا، وهى توضع ليتفاعل معها القلويات وتتجنب التفاعل مع الركام، انظر شكل (12-6) وتوجد بعض أنواع الركام تتفاعل مع قلويات الأسمنت ولكن يسمى التفاعل بـ Cement Aggregate Reaction وهذا الركام به Porous Silica أو Hydrated Silica Mineral مثل الأوبال و Volcanic Glass ويصعب التفرقة بين التفاعلين المذكورين سابقاً.



شكل (12-6) تأثير محتوى القلويات والمواد البوزولانية (الرماد الطائر)



حيث يتم تحليل الركام بالأشعة السينية المفرقة (X-Ray Diffraction Analysis) (ASTM C 295).

ويتم تصوير الركام بالميكروسكوب الإلكتروني (Scanning Electron Microscopy)، على أن يقوم الجيولوجي بعمل تقرير عن كمية وتركيب المواد القابلة للتفاعل القلوي.

- إجراء اختبارات الأدائية التالية:
- وتلك الاختبارات المذكورة في جدول (8-6).

جدول (8-6) الاختبارات المطلوبة للكشف عن التفاعل القلوي السليسي

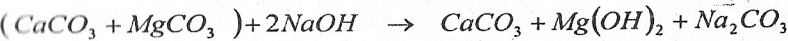
رقم الاختبار	التحليل	مدى الصلاحية للاستخدام	الإجراء
1- اختبار تمدد منشور المونة المعجل ASTM C 1260	يقاس تمدد المنشور خلال 14 يوم	يستخدم الركام إذا لم يزد التمدد على 0.10%	يجري الاختبار رقم 2 إذا كان التمدد بين 0.1 ، 0.2 % ويفرض الركام إذا زاد التمدد على 0.2%
2- التفاعل القلوي على منشور من الخرسانة ASTM C 1293-01	يقاس التمدد خلال عام	يستخدم الركام إذا قل التمدد عن 0.04%	يستبعد الركام إذا زاد التمدد على 0.04 %

#### 2-1-9-6 طرق معالجة وجود هذا الفعل:

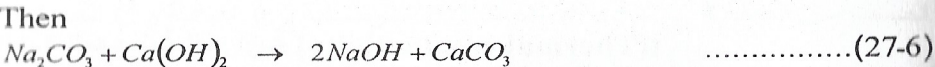
- استخدام أسمنت بورتلاندي يحتوي على نسبة منخفضة من القلويات لا تتجاوز 0.6% بحيث تكون محسوبة على هيئة أكسيد صوديوم مكافئ  $\text{Na}_2\text{O}$ .
- أكسيد الصوديوم المكافئ = أكسيد الصوديوم + 0.66 أكسيد البوتاسيوم
- إحلال جزء من الأسمنت بمادة بوزولانية على أن تكون تلك المادة فعالة في تقليل ظاهرة التفاعل القلوي. ومن المفضل أن تكون تلك المواد مقللة لانكماش الخرسانة لتقاوم تفاعل Cement Aggregate Reaction.
- تقليل نسبة الرطوبة في الخرسانة عن طريق عزل الخرسانة باستخدام أغشية أو دهانات غير منفذة للماء.

#### 2-9-6 التفاعل القلوي الكربوني (Alkali Carbonate Reaction):

سجل في الولايات المتحدة وكندا العديد من هذا التفاعل. وهذا التفاعل يتم بين قلويات الأسمنت وبعض أنواع الحجر الجيري الدولوميتي (Dolomitic Lime Stone). ولخص ملحوشو هذا التفاعل كما يلي:



(26-6)

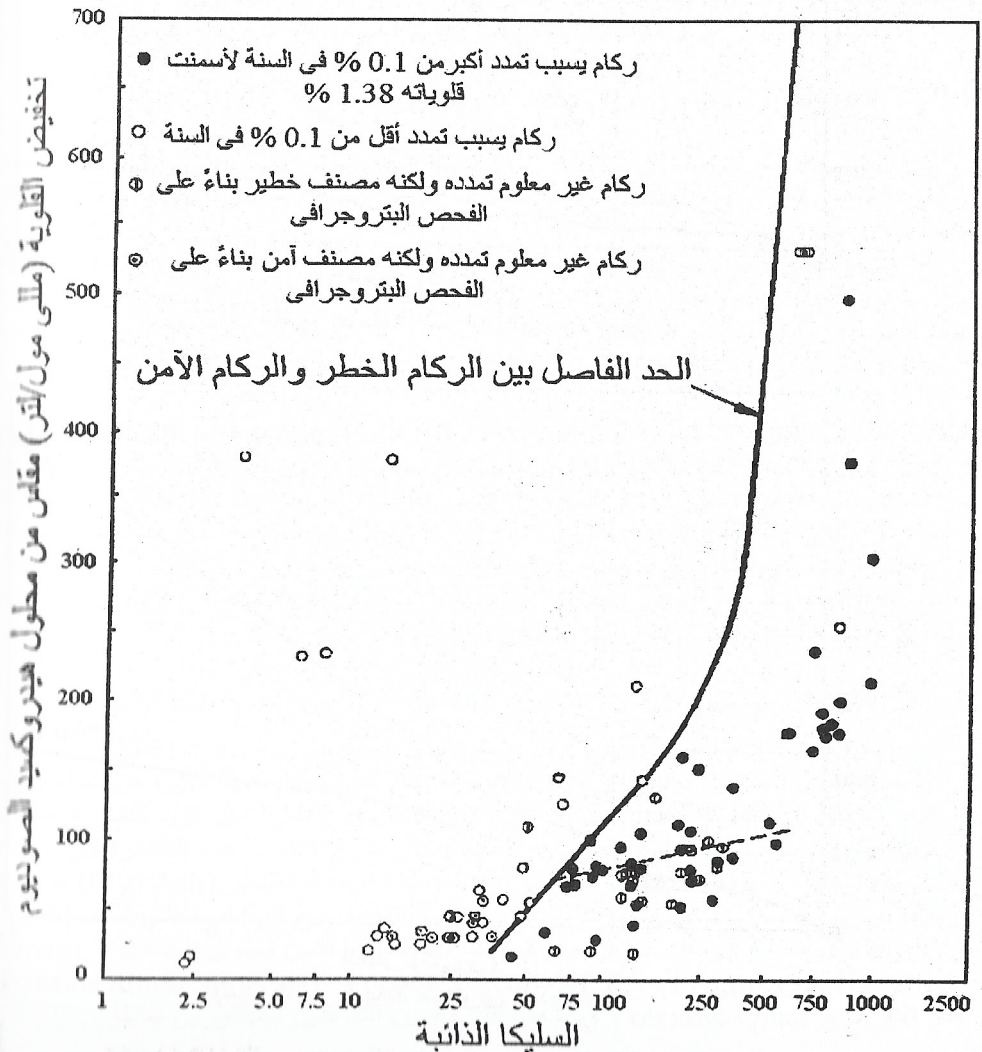


كما هو موضح في المعادلة الأولى، يتحول الدولوميت إلى كالكسيت وبروسيت. وكما هو واضح من المعادلة الثانية أن كربونات الصوديوم تتحد مع هيدروكسيد الكالسيوم، وينتج عنه هيدروكسيد صوديوم. وهذا خطير جداً، لأن التفاعل ينتج قلويات جديدة مما يجعل مهاجمة الحجر مستمر دائماً. ولذلك عند اكتشاف وجود هذه الظاهرة وعندما تؤكد الدراسات وجود تمدد

#### 1-1-9-6 الكشف على التفاعل القلوي السليسي:

يمكن استخدام الاختبارات التالية التي وردت في هيئة المواصفات الأمريكية للمواد (ASTM) والكود المصري للخرسانة (كود رقم 203-2007):

- استخدام الطريقة الكيميائية:
- وهي تجربة ابتدائية لتقييم قابلية الركام للنشاط (ASTM C 289)، وهي تجربة كيميائية سريعة يتم قياس قلوية محلول  $\text{NaOH}$  موضوع فيه مسحوق الركام المختبر عند 80 درجة مئوية، ويتم تحديد كمية السليكا الذائبة، وباستخدام شكل (6-13) الذي يوضح العلاقة بين السليكا الذائبة والخفض في القلوية ويمكن الحكم على نشاط الركام ابتدائياً.



شكل (6-13) العلاقة بين السليكا الذائبة لمسحوق ركام من MM300 إلى MM150 والمقادير في القلوية التحليل البتروجرافي.



كبير في الاختبارات، فيجب استبعاد هذا الركام أو يستخدم مع أسمنت خالي من القلويات. ولا يمكن استعمال المواد البوزولانية أو تخفيض قلويات الأسمنت في هذه الحالة.

\* الكشف على التفاعل القلوي الكربوناتي:

يستخدم التحليل البتروجرافى كما سبق ذكره، حيث يتم تحديد نسبة الكالسيوم ونسبة الدولوميت في الركام وهل توجد معادن طينة أم لا. يتم عمل تجارب الأداينية التى نص عليها كود الخرسانة رقم 203-2007، كما بجدول (9-6).

جدول (9-6) الاختبارات المطلوبة للكشف عن التفاعل القلوي الكربوناتي

رقم الاختبار	التحليل	مدى الصلاحية للاستخدام	الإجراء
1- التفاعل القلوي لأسطوانة من الصخر ASTM C 586-81	يتم تحديد التمدد خلال عام	يستخدم الركام إذا قل التمدد عن 0.10%	يجرى الاختبار 2 إذا كان التمدد أكبر من 0.1%
2- التفاعل القلوي على منشور من الخرسانة ASTM C 1105-95	يتم تحديد التمدد خلال عام	يستخدم الركام إذا قل التمدد عن 0.015% عند عمر 3 شهور 0.025% عند عمر 6 شهور 0.030% عند عمر سنة	يستبعد الركام إذا زاد التمدد على 0.04%

ويرى المؤلف أنه يجب على الدولة أو الشركات التى تقوم بعملية التحجير وتكسير الركام عمل فحص كل سنة للمحجر، حيث تحدد المساحة التى سيتم استعمالها من المحجر خلال هذه السنة. حيث يتم استخراج عينات من أماكن مختلفة من هذه المساحة، تُجرى عليها الاختبارات اللازمة فى السنة السابقة لسنة الاستخدام. ويتم تسليم تقارير بهذه الاختبارات للمقاولين والملاك والجهات المسؤولة. وقد وفقنى الله بعمل دراسة عن محاجر كسر احجار مرسى مطروح والحمام وفوكه والجلاله فى الساحل الشمالى الغربى. وأثبتت الدراسات على بعض العينات خلو هذا الركام من هذا النشاط. وخلال عمر ثلاثين عام من استخدام هذا الركام فى مشاريع كثيرة، لم يحدث مشاكل من هذا الركام مما أكد نتائج البحث. ونحن ننصح بعدم استخدام ركام شهر مختبر فى المنشآت التى تتعرض للرطوبة مثل الأساسات والخوازيق.

## 10-6 الخواص الحرارية للخرسانة (Thermal Properties of Concrete):

إن الخواص الحرارية للخرسانة تصبح ذات أهمية فى عدد محدود من التطبيقات مثل الخرسانة الكتلية أو عند حساب فواصل التمدد أو البلاطات التى يتطلب فيها نوع معين من العزل الحرارى. وسنتناول فى ما يلى بعض الخواص الحرارية.

### 1-10-6 الموصلية الحرارية (Thermal conductivity):

وهى تقيس قابلية المادة لتوصيل الحرارة، وتقاس بال جول لكل ثانية لكل متر مربع من مساحة المقطع الخرساني للعضو عندما يكون الفرق فى درجة الحرارة 1 درجة مئوية خلال

1 متر من سمك العضو (J/m<sup>2</sup> sec °C/m). والموصلية تعتمد على مكونات الخرسانة المتصلدة من حيث نوع الركام وكمية العجينة ودرجة الرطوبة. فالموصلية الحرارية للزلط أكبر من الحجر الجيري والدولوميت، والموصلية تزيد كلما زاد الماء فى الخرسانة المتصلدة. كما أن

وجود الهواء المحبوس والهواء عامة يقلل كثيراً من الموصلية الحرارية، التى تتراوح للخرسانة بين 1.4 إلى 3.6 جول/م<sup>2</sup>ث°م. ولذلك فمن المتوقع أنه كلما زادت كثافة الخرسانة وتحسن الدمك، فإن الموصلية الحرارية تكون عالية. وهذا مايجب التنبيه عليه للخرسانة عالية وفائقة المقاومة، حيث أن موصليتها الحرارية ستكون عالية وبالتالي فإن تأثيرها بالحريق وإطفاءه يكون كبير. ويمكن تقدير محتوى الماء المتوسط فى الخرسانة المتصلدة الغير معزولة بين 5.00، 8.00% بالوزن للخرسانة العادية والخفيفة على الترتيب. بينما فى حالة تلك الخرسانة المعزولة يقل محتوى الماء إلى 2.5، 5.0% على الترتيب. وجدول (10-6) يحتوى على قيم المرحها كل من لوودون وستاسيى للموصلية الحرارية.

جدول رقم (10-6) قيم الموصلية الحرارية للخرسانة العادية الوزن والخفيفة.

وحدة الخرسانة كجم/م <sup>3</sup>	الموصلية لخرسانة محمية من الجو جول / م <sup>2</sup> ث° م				الموصلية لخرسانة معرضة للجو جول / م <sup>2</sup> ث° م			
	خرسانة ذات هواء	خرسانة خفيفة *	خرسانة خفيفة **	خرسانة عادية الوزن	خرسانة ذات هواء	خرسانة خفيفة *	خرسانة خفيفة **	خرسانة عادية الوزن
320	0.109	0.087	0.13	-	0.123	0.100	0.145	-
480	0.145	0.116	0.173	-	0.161	0.13	0.187	-
640	0.203	0.159	0.230	-	0.223	0.173	0.26	-
800	0.26	0.203	0.303	-	0.273	0.23	0.332	-
960	0.315	0.26	0.376	-	0.36	0.289	0.433	-
1120	0.389	0.315	0.462	-	0.433	0.360	0.519	-
1280	0.476	0.389	0.562	-	0.533	0.433	0.635	-
1440	-	0.462	0.678	-	-	-	-	0.808
1600	-	0.549	0.794	0.706	-	-	-	0.952
1760	-	0.649	0.952	0.838	-	-	-	1.194
1920	-	-	-	1.056	-	-	-	1.488
2080	-	-	-	1.315	-	-	-	1.904
2240	-	-	-	1.696	-	-	-	2.561
2400	-	-	-	2.267	-	-	-	-

\* خبث مخفف

\*\* طين مخفف

### 2-10-6 الانتشارية الحرارية (δ) (Thermal Diffusivity):

الانتشارية تمثل المعدل الذى عنده تنتشر التغيرات الحرارية فى داخل الكتلة الخرسانية (δ).

و δ تحسب من المعادلة  $\delta = \frac{k}{c \gamma}$ ، حيث أن k الموصلية و γ الكثافة و C الحرارة النوعية.

وتراوح القيمة المتوسطة للخرسانة بين 0.002 و 0.006 م<sup>2</sup>/ساعة. ولقياسها يجب تثبيت درجة رطوبة الخرسانة. وتزيد الانتشارية لخرسانة الزلط وتصبح أقل لخرسانة الأحجار المعزولة.



### 3-10-6 الحرارة النوعية (C)(Specific Heat):

وهي تمثل السعة الحرارية للخرسانة، والتي تتراوح في المتوسط بين 840 ، 1170 جول/كجم/°م. والتي تزيد بزيادة محتوى الماء في الخرسانة المتصلدة ولا تتأثر كثيراً بنوع الركام.

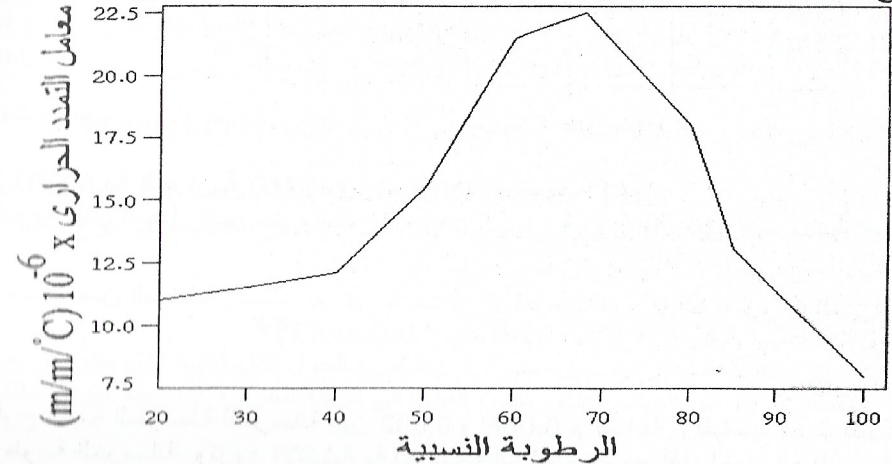
### 4-10-6 معامل التمدد الحرارى (Coefficient of Thermal Expansion):

إن الخرسانة مثل أى مادة إذا ارتفعت درجة حرارتها، فإنه يحدث زيادة فى طولها، ويسمى ذلك بالتمدد الحرارى. ويتوقف معامل التمدد الحرارى للخرسانة على نوع الركام وكمية الرطوبة النسبية المحيطة وطريقة معالجة الخرسانة ودرجة حرارة الجو نفسه. جدول (11-6) يحتوى على قيم معامل التمدد الحرارى لأنواع مختلفة من الركام والمعالجة.

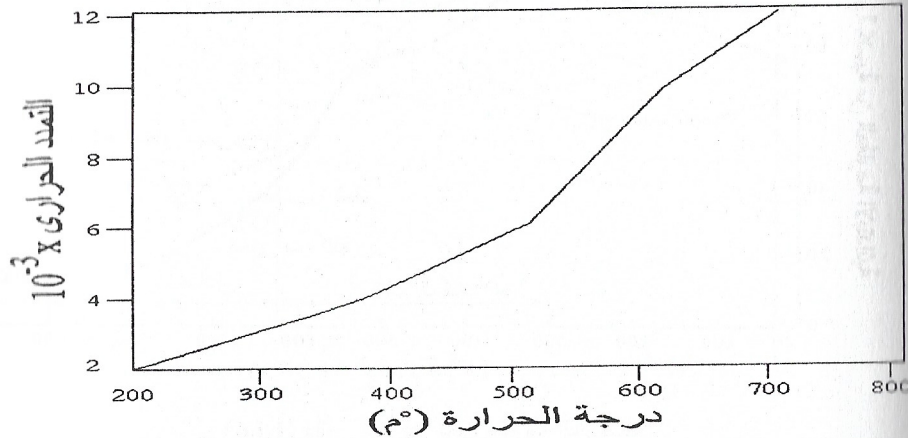
جدول (11-6) قيم معامل التمدد الحرارى لخرسانة بنسبة أسمنت: ركام (1: 6) والقيم تُضرب فى 10-6 سم/سم/°م

نوع الركام الكبير	خرسانة معالجة فى الهواء	خرسانة معالجة فى الماء	خرسانة معالجة فى الهواء ولكنّها مبللة
زلط	13.1	12.2	11.7
حجر رملى	11.7	10.1	8.6
حجر جبرى	7.4	6.1	6.5
خبث حديد	10.6	9.2	8.8
جرانيت	9.5	8.6	7.7

والجدول السابق يوضح أن خرسانة الحجر الجبرى تحقق أقل معامل تمدد حرارى. كما أن معالجة الخرسانة فى الماء تقلل معامل التمدد الحرارى بالمقارنة بالمعالجة فى الهواء. وبالأخص أن خرسانة الزلط لها أعلى معامل تمدد. كما أنه يجب التنويه إلى أن عجينة الأسمنت المتصلدة مع الماء تحقق معامل تمدد حوالى 1.90 مرة معامل تمدد الخرسانة. شكل رقم (14-6) يوضح تأثير الرطوبة النسبية على معامل التمدد الحرارى لعجينة أسمنتية عمرها ستة أشهر.



شكل (14-6) تأثير الرطوبة النسبية على معامل التمدد الحرارى لعجينة أسمنتية عمرها 6 شهور



شكل (15-6) تأثير درجة الحرارة المرتفعة على معامل التمدد الحرارى للخرسانة

### 11-6 مقاومة الخرسانة للحريق:

تتعرض المنشآت الخرسانية فى بعض الأحيان للحريق. وترتفع درجة الحرارة المصاحبة للحريق وتصل لدرجات حرارة عالية إذا استمر الحريق لفترة طويلة. وارتفاع درجة الحرارة له تأثير سلبي على كل من الركام والمونة الأسمنتية وصلب التسليح. ويعتبر تأثير الحريق على صلب التسليح مدمر، حيث أنه يؤدي إلى نقص إجهاد الخضوع ومقاومة الشد (كمثال، عند درجة حرارة 430، 600 درجة مئوية يحدث نقص قدره 50% من إجهاد الخضوع لصلب تسليح الخرسانة سابقة الإجهاد وصلب التسليح العادى على الترتيب). بالإضافة إلى زيادة كبيرة فى التشكل. ولذلك فإن وجود الخرسانة حول صلب التسليح هو الحماية الرئيسية لصلب التسليح. وكذلك فمن المهم رفع كفاءة الخرسانة فى الحريق وزيادة سمك الغطاء الخرساني ليحمى صلب التسليح. ويجب على المهندس تقدير الحمل الحرارى الواقع على العنصر الخرساني.

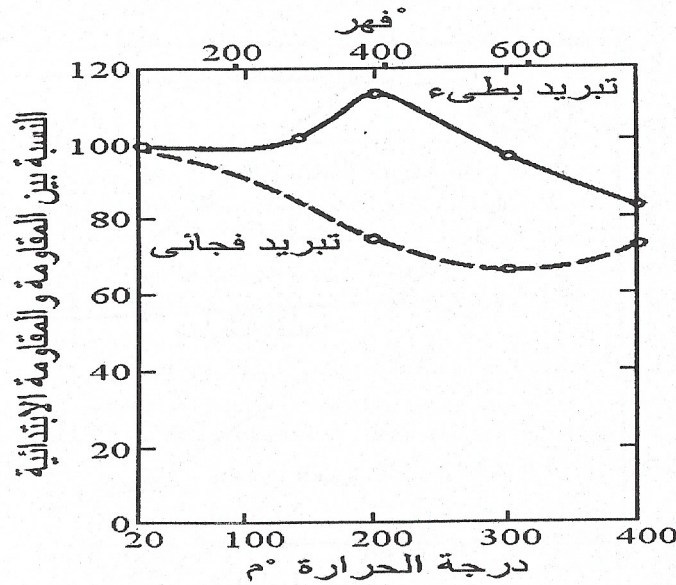
### 1-11-6 العوامل المؤثرة على مقاومة الخرسانة للحريق:

وتعرف مقاومة الخرسانة للحريق بالفترة الزمنية التي خلالها تكون الخرسانة معرضة لهجوم الحريق، وتكون الخرسانة سلوكها جيد وتؤدي وظيفتها دون أن يفقد العنصر الخرساني وظيفته أو ينهار. ويمكن الحكم على هذه المقاومة من خلال عدة مقاييس ومنها القدرة على تحمل الأحمال الخارجية ومقاومة اختراق اللهب للخرسانة ومقاومة انتقال الحرارة.

1- تأثير درجة الحرارة على مقاومة الضغط:

شكل (16-6) يوضح تأثير درجة الحرارة على مقاومة الضغط لكل من خرسانة الزلط وخرسانة الحجر الجبرى.





شكل (17-6) تأثير معدل التبريد على مقاومة الخرسانة

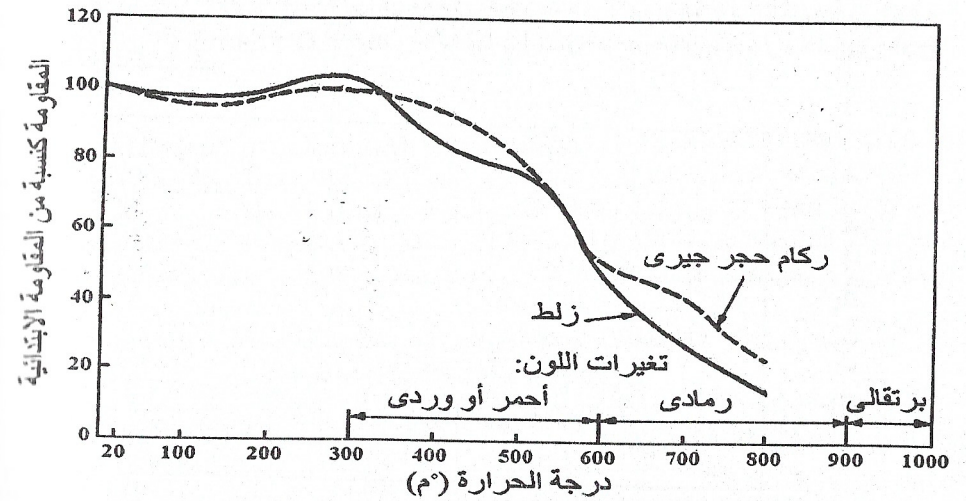
وهذا الشكل يوضح أهمية الإسراع في إطفاء المنشأ، وبحيث لا يكون الإطفاء فجائي مثل استخدام الماء أو الماء البارد، وأثبتت الأبحاث أن استخدام ثاني أكسيد الكربون يقلل الخفض في مقاومة المنشأ. وأثناء عملية الإطفاء يجب تواجد خبير يلاحظ ظهور الشروخ أو حدوث ترخيم زائد أو تغير لون الخرسانة بحيث لا يحدث انهيار. وسوف نذكر تغير لون الخرسانة مع زيادة درجة الحرارة.

### 2. تأثير درجة الحرارة على لون الخرسانة:

وبلاحظ أن لون الخرسانة من 300 درجة مئوية وحتى 600 درجة مئوية يكون لون وردي أو أحمر، ثم يتحول للون الرمادي من 600 وحتى 900 درجة مئوية، ثم يتحول اللون إلى لون لامع حتى 1200 درجة مئوية، ثم يتحول اللون إلى اللون الأصفر إذا زادت درجة الحرارة عن 1200 درجة مئوية.

### 3. تأثير درجة الحرارة على مقاومة الشد ومعايير المرونة للخرسانة:

ولقد أثبتت الأبحاث التي قام بها قسامي (Kasami) وأوكينوا أن التخفيض في مقاومة الشد للخرسانة يكون أكبر من التخفيض في مقاومة الضغط عند نفس درجة حرارة الحريق. أثبتت الأبحاث مثل الأبحاث التي قام بها قسامي أن التخفيض الذي يحدث في معايير المرونة نتيجة الحروق يكون أكبر من التخفيض الحادث في مقاومة الضغط. وشكل (18-6) يوضح تأثير درجة الحرارة على معايير المرونة النسبية ومقاومة الشد. وأثبت مارشال أنه عند 400 درجة مئوية حدث نقص في معايير المرونة قدره 6% من قيمته في درجة الحرارة العادية تقريباً. وبالرجوع للفقد المناظر في مقاومة الضغط نجد أنه يتراوح بين 7% و 17%. ومن هذا يتضح أنه من المتوقع نتيجة الحريق أن تزيد تشكلات الكمرات والبلاطات.



شكل (16-6) تأثير الحريق على مقاومة الخرسانة

- وقد قام زولدنير بدراسة تغير اللون مع زيادة درجة الحرارة ويتضح من المنحنى أنه:
- رفع درجة الحرارة من درجة حرارة الغرفة وحتى 150 درجة مئوية تقريباً يؤدي إلى نقص في مقاومة الضغط، وذلك نتيجة تأثير زيادة درجة الحرارة على حل الأسمنت.
  - من درجة حرارة 150 وحتى 280 درجة مئوية تقريباً تحدث زيادة طفيفة في مقاومة الضغط.
  - من درجة حرارة حوالي 280 درجة مئوية وحتى 580 درجة مئوية تقريباً يحدث فقد لمقاومة الضغط نتيجة الحرق.
  - من 580 درجة مئوية وحتى 800 درجة مئوية يحدث فقد في المقاومة بمعدل أكبر.
  - عند 800 درجة مئوية تفقد خرسانة الزلط 85% من مقاومتها وتفقد خرسانة كسر الأحجار الجيرية 77% من مقاومتها.
  - ويلاحظ عامة أن معدل فقد المقاومة لخرسانة الزلط تكون أكبر من الفقد في المقاومة في خرسانة الحجر الجيري وهذا ما أكدته الأبحاث الأخرى التي قام أهرامر بإجرائها.

وشكل (17-6) يوضح تأثير درجة الحرارة على مقاومة ضغط الخرسانة منسوبة إلى مقاومة الخرسانة للضغط عند 20 درجة مئوية لدرجات تبريد مختلفة.



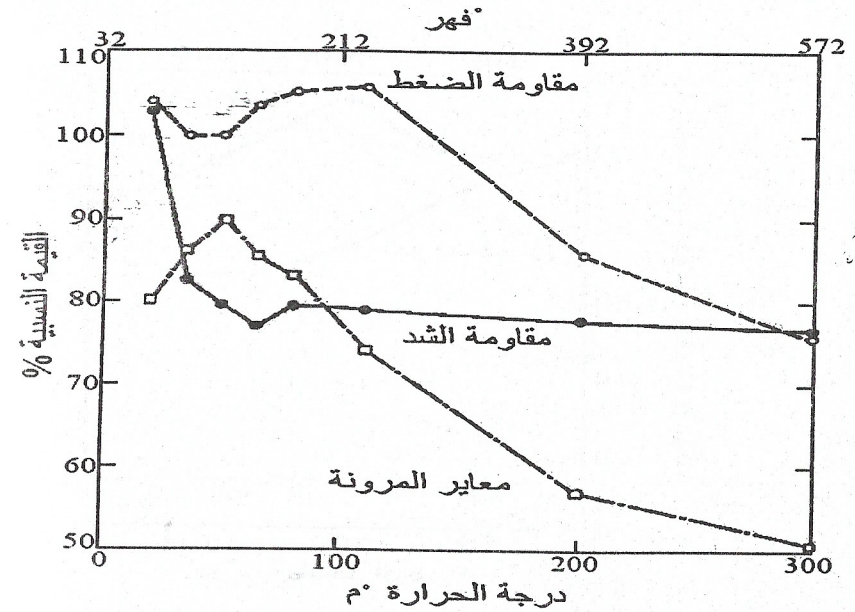
4. في حالة المنشآت الهامة مثل الفنادق الخمسة نجوم أو المسارح أو المنشآت العسكرية، يفضل عمل مواد عازلة حول الأعضاء الخرسانية وخاصة الأعمدة. وتستخدم مواد عازلة للحرارة ثبت كفاءتها بشهادات معملية معتمدة. 5. استخدام غطاء خرساني.

يقوم المهندس بحساب الزمن المتوقع لوصول رجال الإطفاء، ويأخذ معامل أمان كاف. وبناء عليه يحدد مدة الحريق المطلوبة للمنشأ. وبناء على نوع العضو الخرساني (عمود، كمر، بلاطة) يتم اختبار سمك الغطاء الخرساني بالمليمتر، ويعطى الكود المصري للخرسانة سمك الغطاء المناظر لمدة حمايه من الحريق سواء للخرسانه المسلحة أو سابقة الإجهاد. ويجب مراعاة ما يلي:

أ- يراعى ألا يقل سمك الغطاء الخرساني الأدنى لمقاومة الحريق عما هو وارد في الكود المصري للخرسانة رقم 203-2007، ولا عن قطر سيخ تسليح مستخدم. ب- إذا زاد سمك الغطاء الخرساني خارج الكانات عن 40مم، فقد يفصل الغطاء الخرساني، وعندئذ يلزم أخذ احتياطات لمنع حدوث الانفصال، مثل الحماية بطبقة من البياض مع تقليل سمك الغطاء أو استخدام شبكة من التسليح الإضافي على بعد 20مم من وجه الخرسانة.

ج- عند حماية الخرسانة بطبقة من البياض يؤخذ سمك طبقة البياض كغطاء خرساني إضافي مكافئ، وذلك على النحو التالي:

1. في حالة البياض من المونة الأسمنتية أو الجبس، يؤخذ سمك طبقة البياض المكافئ مساوياً 0.6 سمك طبقة البياض الفعلي.
2. في حالة البياض بعازل خفيف الوزن كالفرميكوليت، يؤخذ كامل سمك طبقة البياض على ألا يزيد السمك المعتبر من طبقة البياض على 25مم.

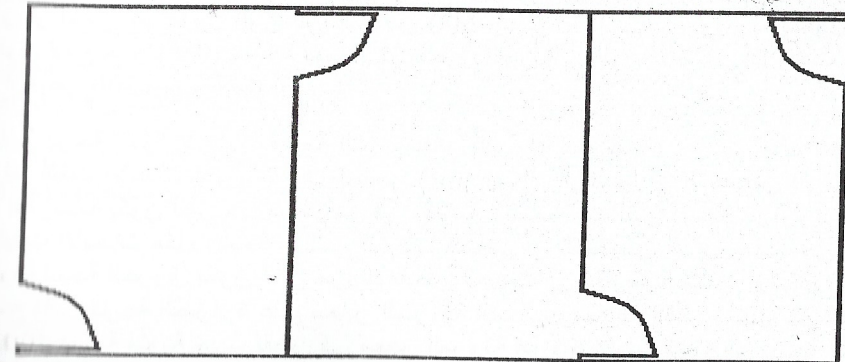


شكل (18-6) تأثير الحرارة على مقاومة الضغط ومقاومة الشد ومعيار مرونة الخرسانة

## 2-11-6 تحسين مقاومة المنشأ للحريق:

يمكن للمهندس تحسين مقاومة المنشأ للحريق عن طريق استخدام أحد أو بعض من التوصيات التالية مع استخدام غطاء خرساني مناسب:

1. تقليل الحمل الحراري المتوقع للمبنى، عن طريق الإقلال على قدر الإمكان من المواد القابلة للحريق أو التي تنتج كمية كبيرة من الحرارة.
2. عمل تصميم معماري يحصر الحريق في مناطق محددة، بحيث لا يحدث انتشار للحريق في باقي أماكن المنشأ. وشكل (19-6) يوضح مثال لتقسيم معماري يحصر الحريق.



شكل (19-6) حصر الحريق بالتقسيمات المعمارية

3. استخدام أحجار جيرية أو دولوميت بدلاً من الزلط.